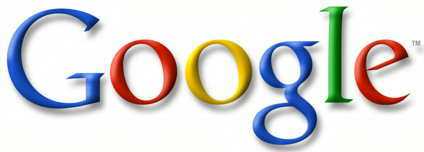







STANFORD UNIVERSITY
LIBRARIES

Diesel.

LA

TRACTION MÉCANIQUE

DES

TRAMWAYS

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

LA

TRACTION MÉCANIQUE

DES

TRAMWAYS

ÉTUDE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES

COMPARAISON ET PRIX DE REVIENT

Diesel.

PAR

RAYMOND GODFERNAUX

Ingénieur des Arts et Manufactures
Attaché à l'Exploitation du Chemin de fer du Nord et à la Direction de diverses Compagnies de Chemins de fer d'intérêt local.



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1898

INTRODUCTION

La transformation de l'industrie des transports en commun dans les villes, qui s'opère si rapidement sous nos yeux, depuis la substitution de la traction mécanique à la traction animale, nous a paru digne d'être notée.

Électricité, air comprimé, eau surchauffée, vapeur à production instantanée, sont concurremment appliqués en ce moment.

Nous nous sommes proposé, en publiant cet ouvrage, de fournir à ceux qui s'intéressent à la question de *la traction mécanique des tramways*, les éléments d'une étude sur les différents moteurs en service, d'exposer les derniers perfectionnements dont ils ont été l'objet, de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun d'eux, afin de permettre la comparaison entre les divers systèmes de traction, tant au point de vue technique qu'au point de vue des applications dont ils sont susceptibles.

Cet ouvrage débute par un chapitre consacré à l'étude de

la résistance des véhicules de tramways à la traction, et, af de simplifier les calculs, nous avons employé les méthod appliquées par les ingénieurs de chemins de fer, méthoc qui permettent d'obtenir, d'une façon simple et rapide, c résultats exacts.

R. G.

LA

TRACTION MÉCANIQUE

DES TRAMWAYS

RÉSISTANCE A LA TRACTION

Dans leur marche, les voitures de Tramways, automotrices ou voitures de remorque, ont à vaincre deux résistances distinctes :

1° Les résistances dues à la marche en palier et en alignement droit, qu'on peut considérer comme constantes, étant donné la vitesse relativement faible des véhicules ;

2° Les résistances supplémentaires, qui dépendent du profil de la ligne et du mode d'exploitation; nous allons examiner ces deux sortes de résistances.

a). *Résistance en palier et en alignement droit.* — Ces résistances se composent :

Du frottement des fusées des essieux du véhicule contre les coussinets des boîtes à graisse, qui est fonction du rapport entre le diamètre des fusées et celui des essieux ainsi que du coefficient de frottement dans les boîtes, lui-même variable avec le mode de graissage ;

Du roulement des roues sur les rails. Cette résistance est très variable. Relativement faible, comme pour les chemins de fer, sur les voies placées en accotement, avec rails saillants, elle peut devenir beaucoup plus importante dans les villes, où on emploie les voies à ornière Marsillon ou la voie à gorge, système Broca ou Humbert.

En effet, l'usure de la table de roulement des rails ou le remplissage de l'ornière ou de la gorge par la boue ou la poussière, fait que souvent les mentonnets des roues reposent sur le fond de la gorge, ce qui augmente considérablement la résistance au roulement. On a reconnu que cette augmentation de résistance était plus grande avec les rails à gorge (Broca-Humbert) qu'avec la voie à ornière Marsillon. En pratique, on ne peut que prendre un coefficient moyen pour la résistance au roulement, en se souvenant que ce coefficient peut doubler et même plus, lorsque les voies sont trop faibles, mal entretenues et que l'ornière ou la gorge ne sont pas maintenues en bon état de propreté ;

Enfin, pour les voitures automotrices, du frottement des appareils moteurs. Ces dernières résistances sont évidemment très variables et ne peuvent guère être déterminées que par l'expérience, suivant le système moteur employé.

Vouloir obtenir par le calcul ces résistances totales, en palier et en alignement droit, serait pour ainsi dire impossible ; aussi a-t-on eu recours aux expériences faites sur des voies en exploitation.

Ces expériences sont assez nombreuses pour permettre de donner des résultats qui s'éloignent peu de la réalité ; nous les donnons ci-dessous :

Résistance totale en palier et en alignement droit par tonne.

	Voiture automotrice.	Voiture de remorque.
Voie à rails saillants.	9 kg.	5 kg.
Voie Marsillon.	13 —	8 —
Voie Broca ou Humbert	14 —	9 —

On pourra prendre comme moyenne pour la voie Marsillon, Humbert ou Broca :

Voiture automotrice	13,5 kg.
— de remorque	8,5 —

b). *Résistances supplémentaires.*

Les résistances supplémentaires se composent :

1° Des résistances dues aux rampes. Cherchons quelle est la

valeur de cet effort supplémentaire. Supposons (fig. 1) un véhicule de poids P sur une rampe dont l'inclinaison avec l'horizontale fait un angle α. La force OP qui représente le poids P du véhicule peut se décomposer, en construisant le parallélogramme des forces, en deux composantes OM et ON.

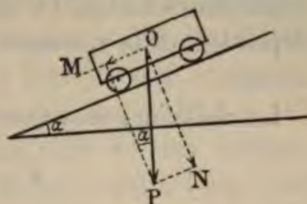


Fig. 1.

ON qui est perpendiculaire au sol représente l'adhérence et OM est la force qu'il s'agit d'équilibrer; elle a pour valeur $OM = OP \sin \alpha$; or, comme les angles avec l'horizontale, qui représentent les rampes sont toujours très petits, on peut confondre le sinus de ces angles avec leur arc, ce qui donne en appelant F′ l'effort supplémentaire : $F' = OM = P.\alpha$.

En palier, l'effort théorique nécessaire aurait été : $P \times f$ (en appelant f le coefficient de résistance en palier), de sorte que l'effort total est :

$$F = P.\alpha + Pf = P(\alpha + f);$$

soit pour un poids de 1 000 kg. :

$$F = 1\,000\,(\alpha + f).$$

Ce qui revient à dire qu'une rampe donnée α, augmente l'effort de traction par tonne, d'autant de kilogrammes qu'il y a dans l'expression de la rampe, de millimètres par mètre;

2° Des résistances dues aux courbes. Ces résistances proviennent : de la solidarité des roues et des essieux qui a pour résultat de faire glisser la roue intérieure sur le rail; du parallèlisme des essieux qui force dans les courbes la voiture à tourner en glissant autour de son centre de gravité, enfin du frottement des mentonnets des bandages des roues contre le rail.

Dans quelques voitures nouvellement construites, on a cherché, dans les limites du possible, à réduire la résistance due au parallélisme des essieux en employant des trucks articulés ou bogies, comme en Amérique, où ce dernier système est très en faveur.

La résistance due aux courbes est très faible dans les courbes de grand rayon, mais dans les courbes de très petit rayon (20 m. et au-dessous) elle peut atteindre 18 kg. par tonne. Pour les lignes de

tramways qui n'ont qu'exceptionnellement des courbes d'un assez faible rayon, on peut prendre une moyenne de 10 kg. par tonne[1];

3° Des résistances dues au démarrage. Ces résistances sont importantes lorsqu'il s'agit de tramways à arrêts fréquents ; elles dépendent de la vitesse à acquérir en un temps donné et fixé par avance.

La résistance moyenne par tonne due au démarrage est :

$$F = m\frac{dv}{dt} = \frac{1000}{g} \times \frac{v}{t};$$

F = résistance moyenne pour obtenir le démarrage ;
v = vitesse en mètres par seconde, à atteindre ;
t = temps donné pour obtenir cette vitesse.

Si, par exemple, on veut atteindre une vitesse de 4 m. en 15″, on aura une résistance moyenne à vaincre par tonne de :

$$\frac{1000}{9,81} \times \frac{4}{15} = 27,2 \text{ kg.}$$

Le travail supplémentaire par tonne dû au démarrage est :

$$T = \frac{1000}{g} \times \frac{v^2}{2} = 51v^2.$$

Dans le cas précédent, le travail supplémentaire dû au démarrage sera par tonne :

$$T = 51 \times \overline{4}^2 = 816 \text{ kgm.}$$

Ces trois résistances supplémentaires qui viennent s'ajouter à la résistance en palier et en alignement droit sont, comme on le voit, très variables ; elles dépendent du profil de la ligne, des rayons des courbes et du nombre de celles-ci, ainsi que du mode d'exploitation, c'est-à-dire du nombre d'arrêts à prévoir dans le parcours.

[1] Dowson, dans son travail sur la traction électrique publié dans *Engineering*, donne la formule empirique suivante, qui s'applique à des rayons de courbe variant entre 30 m. et 7,5 m. et une vitesse de 5 km. à l'heure : $\frac{A}{R}$,

R = rayon de la courbe ;
A = coefficient variable suivant l'écartement des essieux et qui est le suivant :

Ecartement.	A
1,22 m.	302
1,83 —	393
2,13 —	430

Pour obtenir des chiffres exacts, il faut donc chercher la résistance moyenne pour chaque cas particulier. Nous indiquerons plus loin la méthode à suivre pour obtenir cette résistance.

Toutefois, l'expérience a démontré que lorsqu'il s'agit de lignes de tramways à rampes modérées (ne dépassant pas 35 mm. et cela sur de faibles longueurs), où les arrêts ne sont pas trop nombreux et où les courbes de faible rayon sont peu nombreuses (7 à 8 p. 100 de la longueur totale), l'effort supplémentaire dû aux rampes, aux courbes et aux démarrages, peut être pris égal à 4 kg. pour les voitures automotrices et pour les voitures de remorque. En ajoutant ce chiffre d'effort supplémentaire à ceux indiqués précédemment pour les résistances moyennes en palier et en alignement droit et applicables aux voies Marsillon et Broca, on obtient la résistance totale à la jante par tonne :

Voiture automotrice.	Voiture de remorque.
13,50 kg. + 4,00 kg. = 17,50 kg.	8,50 kg. + 4 = 12,50 kg.

Dans le cas de lignes de tramways ordinaires, à rampes modérées, ces derniers chiffres permettent de calculer rapidement le travail moyen par kilomètre-voiture, à la jante des roues, soit qu'il s'agisse d'une voiture automotrice seule, soit qu'il s'agisse d'une voiture automotrice remorquant une ou plusieurs voitures.

Toutefois ce résultat ne sera qu'approximatif et, s'il est nécessaire de connaître exactement le travail supplémentaire, il faut recourir à la méthode dont nous avons parlé plus haut et que nous allons développer.

Calcul du travail pour un parcours donné; travail moyen. Résistance moyenne.

Supposons (fig. 2) qu'une voiture ait à parcourir une ligne de longueur L dont le profil est indiqué ci-après et cela dans la direction A.

Nous admettrons que les courbes sont réparties sur une longueur L′ et que la résistance moyenne dans ces courbes est r'. Nous admettrons également que la résistance par tonne en palier et alignement droit est r. Enfin, nous supposerons qu'il y a n arrêts dans ce parcours.

Le travail total à produire par tonne se compose :

1° Du travail à produire sur la distance L, comme si la ligne était en palier et alignement droit. Ce travail est :

$$R = 1000 \times L.r.$$

2° Du travail dû à la pesanteur et résultant de la différence de niveau entre les points C et D. Ce travail sera positif ou négatif

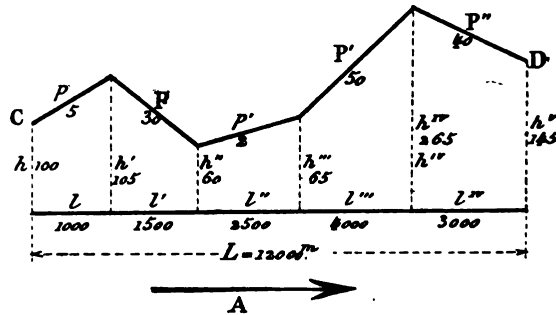


Fig. 2.

suivant que h^{v} sera plus grand ou plus petit que h. Ce travail est :

$$R^{I} = 1000\,(h^{v} - h)$$

3° Du travail dû aux courbes ; ce travail sera représenté par

$$R^{II} = 1000 \times L'r'$$

4° Du travail à produire par les freins, pour maintenir le véhicule sur les pentes d'une inclinaison supérieure à celle correspondant au coefficient de frottement en palier et en alignement droit, soit r. Ces pentes dans la direction de A sont P et P''. Le travail à produire par les freins sur ces deux pentes sera [1] :

$$R^{III} = 1000\,[(P - r)\,l' + (P'' - r)\,l^{IV}]$$

[1] Soit (fig. 2 *bis*) le profil ci-dessous et une voiture se dirigeant dans la direction A.

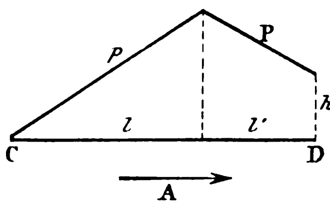


Fig. 2 *bis*.

La pente P est supérieure au coefficient de frottement r.

Le travail à produire par tonne, pour aller de C en D, sera :

$$(p + r)\,l ; \qquad (1)$$

puisqu'il n'y aura pas d'effort de traction sur la pente P.

Ecrivons, comme nous l'avons dit, que le travail total est égal :

1° A la résistance en palier et alignement droit sur la ligne entière ;

2° A la différence de niveau h ;

5° Du travail dû aux démarrages, en supposant que ces démarrages sont au nombre de n. La formule précédemment indiquée nous donne :

$$R^{IV} = n \times 51 v^2$$

Le travail total à produire sera la somme de tous ces travaux partiels et sera :

$$\Sigma R = 1000 [Lr + L'r' + (h^{v} - h) + (P - r) l' + (P'' - r) l^{IV}] + 51 n v^2$$

Si maintenant, comme il arrive toujours pour les lignes de tramways, la voiture revient à son point de départ, le travail à produire pour ce retour sera en opérant de la même manière :

$$\Sigma R' = 1000 [Lr + L'r' - (h^{v} - h) + (P'' - r) l^{III}] + 51 n' v^2$$

n' étant le nombre des arrêts au retour.

Le travail total, aller et retour par tonne, sera donc la somme de ces deux valeurs ou :

$$R = 1000 [2Lr + 2L'r' + (P - r) l^{I} + (P^{II} - r) l^{IV} + (P' - r) l^{III}] + (n + n') 51 v^2 \quad (1)$$

et le travail par kilomètre voiture sera :

$$\frac{R}{2L}$$

Cette formule est générale et pourra s'appliquer à tous les cas de la pratique.

Nous en ferons l'application à deux cas ; l'un, celui d'une ligne à

3° Au travail négatif sur la pente P égal à $(P - r)$; nous aurons :

$$T = r (l + l') + h + (P - r) l' ;$$
$$h = pl - Pl' ;$$

d'où

$$T = rl + rl' + pl - Pl' + Pl' - rl' ;$$
$$T = rl + pl = l (r + p)$$

comme dans la formule (1).

Cette méthode qui introduit dans le calcul le travail restitué par les freins dans les pentes, au lieu du travail moteur dans les rampes, n'aurait pas d'avantage dans le cas simple que nous avons pris comme exemple ; mais lorsque le profil se compose d'un nombre considérable de pentes et de rampes, on a seulement à considérer les pentes, dans le sens de la marche, qui sont supérieures au coefficient de frottement et le calcul est très simplifié.

inclinaisons et courbes modérées ; l'autre, celui d'une ligne à fortes inclinaisons et nombreuses courbes de faible rayon.

Premier cas (fig. 3). . . . . . . $\begin{cases} 2L' = 1000 \\ n + n' = 14 \\ r' = 10 \text{ kg.} \end{cases}$

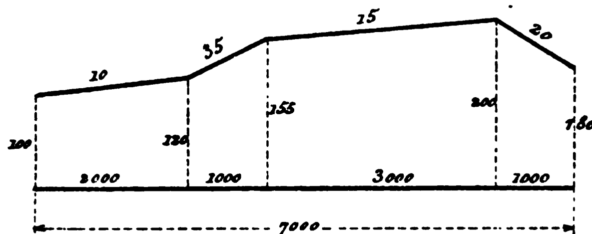


Fig. 3.

Appliquant la formule (1) il vient :

$$R = 1000\,[14000 \times 0{,}0135 + 1000 \times 0{,}010 + (0{,}035 - 0{,}0135)\,1000 + (0{,}015 - 0{,}0135)\,3000 + (0{,}020 - 0{,}0135)\,1000] + 14 \times 51 \times 4^2 = 242\,924 \text{ kgm.}$$

Nous supposons que la vitesse de marche entre les arrêts est de 4 m. par seconde ou 14,4 kil. à l'heure.

Le travail moyen par kilomètre sera donc par tonne de :

$$\frac{242\,924}{14} = 17352 \text{ kgm. ;}$$

d'où l'effort moyen par mètre sera :

$$\frac{17\,352}{1000} = 17{,}35 \text{ kg.}$$

L'effort moyen en palier et alignement droit étant de 13,50, kg. l'augmentation due aux efforts supplémentaires sera :

$$17{,}35 \text{ kg.} - 13{,}50 \text{ kg.} = 3{,}85 \text{ kg. par tonne,}$$

ce qui correspond bien au chiffre que nous avons donné précédemment pour les lignes à inclinaisons modérées.

Deuxième cas (fig. 2). . . . . . . $\begin{cases} 2L' = 6000 \text{ m.} \\ r' = 10 \text{ kg.} \\ n + n' = 24 \end{cases}$

Appliquant la formule (1) il vient (fig. 2) :

$$R = 1000\ [24000 \times 0{,}0135 + 6000 \times 0{,}010 + (0{,}030 - 0{,}0135)\ 1500 + (0{,}050 - 0{,}0135) \times 4000 + (0{,}040 - 0{,}0135)\ 3000] + 24 \times 51 \times 3^2 = 645\,266 \text{ kgm.}$$

Nous supposons que la vitesse de la marche entre les arrêts est de 3 m. par seconde, soit 10,8 kil. à l'heure.

Le travail moyen par kilomètre est donc :

$$\frac{645\,266}{24} = 26\,884 \text{ kgm};$$

d'où l'effort moyen par mètre sera :

$$\frac{26\,884}{1000} = 26{,}89 \text{ kgm};$$

soit une augmentation de 26,89 kg. — 13,50 kg. = 13,39 kg.

L'effort moyen a doublé ; ceci montre l'influence des efforts supplémentaires résultant des lignes où les inclinaisons sont fortes et les courbes nombreuses.

Nous le répétons, l'augmentation d'effort de 4 kg. que nous avons donné plus haut ne s'applique qu'aux lignes à rampes modérées et à courbes de faible rayon peu nombreuses. C'est, du reste, le cas le plus fréquent dans les tramways urbains.

Nous venons d'indiquer le moyen de calculer soit approximativement, soit exactement la résistance moyenne, par tonne à la *jante des roues*, d'un tramway pour un parcours donné, mais il faut aussi connaître le travail maximum à produire lorsque la voiture aura à franchir le passage le plus difficile de la ligne, c'est-à-dire la rampe maximum. Nous allons indiquer la formule qui donne ce travail :

Travail maximum.

Soit :

	Voiture automotrice.	Voiture de remorque.
Résistance en palier et en alignement droit.	r	r_1
Résistance due à la rampe.	μ	μ
Vitesse en mètre par seconde	v	v

Le travail maximum par seconde sur cette rampe sera par tonne, à la jante des roues :

$$T = 1000\,(r + \mu)\,v + 1000\,(r_1 + \mu)\,v = 1000\,[(r_1 + \mu) + (r + \mu)]\,v.$$

A ce travail maximum, il faut ajouter celui dû au démarrage, cas qui peut se présenter, par suite d'un arrêt forcé sur la rampe maximum.

En se reportant à la formule donnée précédemment, ce travail supplémentaire par seconde est :

$$T' = 51 \frac{v^2}{t}.$$

Comme on le voit, ce travail est en raison inverse du temps t nécessaire pour obtenir la vitesse de marche v, ce qui d'ailleurs est évident.

Lorsqu'on se donne le temps t, au bout duquel la vitesse de marche v doit être obtenue, il est facile d'obtenir soit l'accélération g nécessaire pour obtenir cette vitesse v, soit l'espace parcouru au bout de ce temps t, par les formules connues :

$$e = \frac{1}{2} gt^2 ; \quad g = \frac{v}{t} ;$$

La formule précédente donne le travail moyen par seconde, mais non le travail maximum qui est celui qui nous intéresse. Pour l'obtenir reprenons la formule :

$$T = 51 (v^2 - v'^2) , \qquad (1)$$

qui représente le travail à produire pour passer de la vitesse v' à la vitesse v.

Soit : V la vitesse à atteindre au bout du temps T.

L'accélération g sera : $g = \frac{V}{T}$. Or on sait que $v = gt$;

$$v = \frac{V}{T} t \text{ et } v' = \frac{V}{T} t'.$$

Reportant cette valeur dans (1) il vient :

$$T = 51 \left(\frac{V^2}{T^2} t^2 - \frac{V^2}{T^2} t'^2\right) = 51 \frac{V^2}{T^2} (t^2 - t'^2). \qquad (2)$$

Cette formule nous donne le travail en kilogrammètres à produire dans l'espace de $t - t'$, que nous pourrons prendre égal à une seconde.

Le travail résistant dû à la marche en alignement droit et à la rampe entre les deux vitesses v et v' sera :

$$T' = (r + \mu) \left(\frac{v + v'}{2}\right). \qquad (3)$$

Remplaçant v et v' par leur valeur donnée plus haut, il vient :

$$T' = \frac{V}{T}\left(\frac{t+t'}{2}\right)(r+\mu). \qquad (3)$$

Le travail maximum à produire au moment du démarrage sera la somme de ces deux quantités, fournies par les formules (2) et (3).

Comme exemple, soit un démarrage extrêmement rapide à produire en palier ; on veut obtenir la vitesse de 4 m. en 5″.

Le travail dû au démarrage sera pendant la dernière seconde de :

$$T = 51 \frac{\overline{4}^2}{5^2}(5^2 - \overline{4}^2) = 293{,}76 \text{ kgm.}$$

Le travail dû à la marche en alignement droit sera :

$$T' = \frac{4}{5}\left(\frac{4+5}{2}\right) 13{,}5 = 48{,}60 \text{ kgm.}$$

Le travail total à produire sera donc :

$$293{,}76 + 48{,}60 = 342{,}36 \text{ kgm. par tonne et par seconde.}$$

Le travail dû au démarrage sera :

$$\frac{293{,}76}{48{,}6} = 6{,}04 \text{ fois plus grand que le travail de remorque.}$$

Prenons un second exemple : un démarrrage en rampe de 50 mm, et supposons qu'on veuille obtenir en 20 secondes une vitesse finale de 2 m. par seconde.

Nous aurons :

$$T = 51 \times \frac{\overline{2}^2}{20^2}(\overline{20}^2 - \overline{19}^2) = 19{,}89 \text{ kgm.}$$

$$T' = \frac{2}{20}\left(\frac{20+19}{2}\right)(13{,}5 + 50) = 123{,}83 \text{ kgm.}$$

Le travail total à produire sera par tonne et par seconde :

$$19{,}89 + 123{,}83 = 143{,}72 \text{ kgm.}$$

Le travail dû au démarrage sera : $\frac{19{,}89}{123{,}83} = 0{,}16$ du travail de remorque.

En nous reportant à la formule donnée pour le travail maximum en rampe, on verra que la résistance totale est :

P étant le poids de la voiture automotrice,

p — — de remorque,

$$R = P\ (r + \mu) + p\ (r_1 + \mu).$$

En appelant c le coefficient d'adhérence sur les rails qu'on peut admettre en général, comme égal à $\frac{1}{7}$, soit 0,14, il faudra pour éviter le patinage que :

$$P'c > R > P\ (r + \mu) + (r_1 + \mu)\ p;$$

P' étant le poids adhérent de la voiture automotrice, qui peut être le poids total de cette voiture, ou partie seulement de ce poids.

CLASSIFICATION

Les différents systèmes de traction mécanique étudiés ou appliqués aux tramways, dans ces dernières années, sont nombreux et, pour pouvoir les étudier et les comparer, un classement méthodique s'impose.

C'est en se basant sur la manière dont la force ou l'énergie, nécessaire pour produire le mouvement des véhicules, est admise dans ce véhicule que ce classement paraît le plus simple et le plus naturel ; c'est celui que nous avons adopté.

Nous classerons donc les tramways à traction mécanique en trois classes qui sont les suivantes :

Première classe. — Tramways où l'énergie est produite directement sur le véhicule ; cette classe comprend :

Les tramways à vapeur.

a. Système Rowan;

b. — Serpollet.

Deuxième classe. — Tramways où l'énergie est empruntée à une usine centrale et emmagasinée dans le véhicule, ce qui permet de faire un certain parcours au bout duquel le véhicule est obligé de revenir à l'usine pour y renouveler l'énergie dépensée ; cette classe comprend :

Les tramways à locomotive sans foyer ;

— à air comprimé;

— électriques à accumulateurs;

— à gaz.

Troisième classe. — Tramways où l'énergie est empruntée à une usine centrale, mais distribuée aux voitures au moyen de conducteurs, au fur et à mesure des besoins ; cette classe comprend :

Les tramways funiculaires,
— électriques à fils aériens;
— — à fils souterrains;
— — à distributeurs au niveau du sol.

Nous examinerons successivement et dans le même ordre ces différents systèmes de tramways à traction mécanique, en décrivant dans chaque classe les derniers types appliqués ou mis à l'essai, en prenant, autant que possible, nos exemples en France.

Nous examinerons ensuite pour chaque cas le travail moyen par kilomètre-voiture nécessaire pour la mise en marche de ces véhicules, soit que la voiture automotrice soit seule, soit qu'elle remorque une autre voiture.

Dans ce dernier cas, nous admettrons que la voiture remorquée est une voiture à impériale de 50 places pesant en charge 9 tonnes.

Nous supposerons aussi qu'il s'agit d'une ligne à rampes modérées et à courbes de faible rayon (15 à 20 m.) peu nombreuses. Nous admettrons donc les coefficients moyens déterminés dans le chapitre précédent de :

17,50 kg. pour les voitures automotrices;
12,50 kg. — — de remorque ;
la vitesse admise sera de 12 km. à l'heure.

Nous examinerons ensuite le travail maximum à produire sur les rampes maxima. Nous admettrons comme rampe maximum 50 mm., quoique ce chiffre soit exceptionnel dans un réseau urbain, comme celui que nous examinons (à Paris, les plus fortes rampes ne dépassent pas 35 à 40 mm.), et nous admettrons sur ces rampes une vitesse de 5 km. à l'heure.

Enfin, nous chercherons à nous rendre compte, aussi exactement que possible, des dépenses de traction par kilomètre-voiture pour chacun des cas considérés.

Nous entendrons par dépenses de traction :

1° Les dépenses afférentes à la production de la force motrice ;

2° — — au matériel roulant ;

3° — — aux travaux d'entretien et de réparations faites en dehors des ateliers, remises ou dépôts.

Nous ajouterons enfin à ces dépenses celles résultant de l'amortissement du capital engagé et provenant du matériel des dépôts, remises et ateliers, des bâtiments des dépôts, remises et ateliers, du matériel roulant, et enfin des installations faites en dehors et destinées au service de la traction, sans, toutefois, tenir compte des terrains dont la valeur est très variable.

Pour calculer cet amortissement, nous supposerons un réseau moyen d'une trentaine de kilomètres, desservi par 30 automotrices (dont 10 constituent la réserve), parcourant 150 km. par jour, soit au total, en chiffres ronds, 1 000 000 km. par an.

Nous admettrons, de plus, une durée moyenne de concession de vingt années, pendant lesquelles devront être amorties les dépenses afférentes aux bâtiments des usines et des dépôts, ainsi que celles d'une partie du matériel fixe, soit à l'usine centrale, soit sur la ligne. Quant au matériel roulant et à la partie du matériel fixe, des usines et de la ligne, susceptible d'une usure plus rapide, nous admettrons une durée d'amortissement de huit à dix années.

Ces données appliquées aux différents systèmes de traction que nous allons étudier, nous ont conduit à un chiffre d'amortissement de 10 p. 100 que nous avons pris comme moyenne pour tous les systèmes.

PREMIÈRE CLASSE

TRAMWAYS

OU

L'ÉNERGIE EST PRODUITE DIRECTEMENT SUR LE VÉHICULE

TRAMWAYS A VAPEUR

A. *Système Rowan.* — B. *Système Serpollet.*

TRAMWAYS A VAPEUR

L'automotrice à vapeur est de date relativement assez ancienne. Les premières applications pour tramways ont été faites aux États-Unis en 1859 par Latta, Grice et Long; leur apparition en Angleterre date de 1868.

A partir de cette époque, on la trouve sur les chemins de fer aussi bien que sur les tramways urbains et suburbains. Sur les premiers, nous pouvons citer le type Brown à double bogie, construit à Winterthur et mis en service en 1876 sur la ligne de Lausanne à Echallens; le type Belpaire, créé par lui en 1877 et encore en service sur les lignes de l'État belge; un type semblable a été essayé sur les chemins de fer de l'État français; le type Thomas, employé sur les lignes à faible trafic du chemin de fer Louis de Hesse et encore actuellement sur le réseau de l'État saxon. Sur les tramways on retrouve le type Brown, de Winterthur en 1876; le système Perrett employé sur un tramway en Irlande; enfin le type Rowan créé en 1876 et essayé pour la première fois à cette époque à Copenhague.

Le système Rowan est actuellement en service régulier sur un certain nombre de lignes de tramways, notamment à Stockolm, à Copenhague, à Berlin, à Moscou et en France sur les réseaux de Tours à Vouvray, de Lyon, et depuis 1889, sur certaines lignes de la Compagnie générale des omnibus (4 automotrices de ce système sont en service sur la ligne Louvre-Boulogne, 4 sur Louvre-Saint-Cloud, 4 entre Auteuil et Boulogne). C'est ce dernier

type que nous prendrons, comme exemple d'automotrice où la vapeur est produite dans une chaudière de forme spéciale, mais suivant un principe déjà connu.

Nous étudierons ensuite une autre automotrice à vapeur de date toute récente (1893), où la vapeur est produite dans une chaudière multitubulaire à vaporisation instantanée; nous voulons parler de l'automotrice Serpollet, en service notamment sur le réseau de la Compagnie des tramways Nord de Paris et qui vient d'être adoptée tout dernièrement par la Compagnie générale des Omnibus de Paris, sur certaines de ses lignes.

SYSTÈME ROWAN

La voiture automotrice Rowan (fig. 4) se compose d'une caisse reposant à l'avant sur un bogie moteur, par l'intermédiaire de deux ressorts à lame aux extrémités desquels sont fixés des patins coulissant dans des glissières rivées au bâti du bogie. Ce dernier supporte complètement l'appareil moteur, et une partie du poids de la voiture vient s'y ajouter pour augmenter l'adhérence. Ce bogie peut se mouvoir sous la caisse et s'incrire facilement dans des courbes de 20 mètres de rayon.

La voiture est supportée à l'arrière par un truck mobile formé par un châssis rectangulaire consolidé par des diagonales. Une cheville fixée au centre relie le bogie avec la caisse; celle-ci repose également sur ce truck par l'intermédiaire de quatre platines en bronze munies d'appareils de graissage.

Ce bogie d'arrière est à un seul essieu et son déplacement est réglé par deux barres de connexion articulées, d'une part au bâti de ce bogie, et d'autre part au côté opposé de la partie arrière du bogie moteur. Des ressorts intercalés sur les barres adoucissent les mouvements.

Comme l'indique la figure 4, la liaison de la voiture avec le bogie moteur est obtenu au moyen de deux galets verticaux fixés sur celui-ci et entre lesquels peut coulisser une traverse circulaire reliée aux longerons de la caisse. Pour sortir la machine de son bogie, il suffit de soulever la caisse avec un vérin, de manière à faire

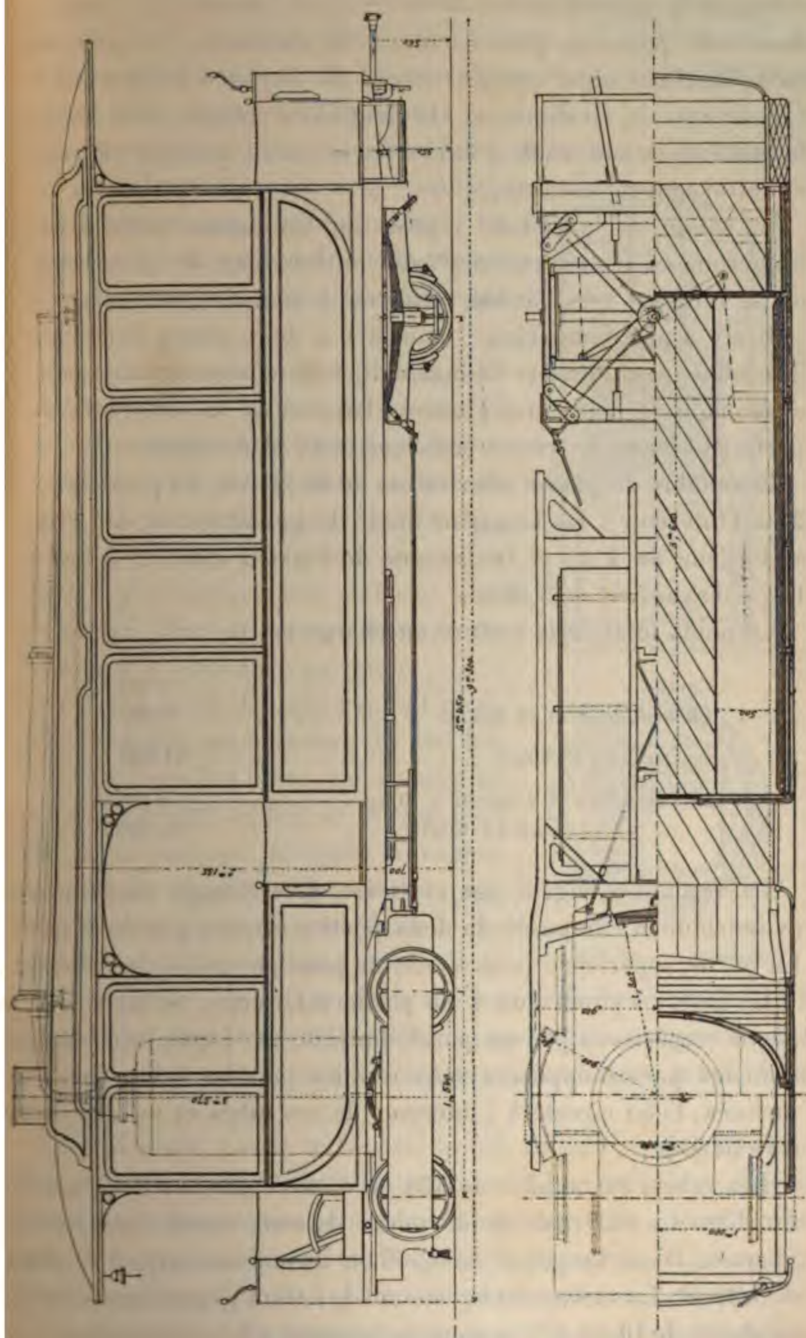


Fig. 4. — Automotrice Rowan de la Compagnie des Omnibus.

échapper le galet d'arrière de la traverse ; à caler les longerons dans cette position, puis à enlever la cheminée, le garde-corps de la machine ainsi que le raccord du tuyau d'échappement de vapeur avec le condenseur. On peut alors retirer, sans difficulté, la machine de son truck et faire avec aisance toutes les réparations et nettoyages nécessaires.

La caisse de la voiture repose sur un châssis formé de deux longerons en fer régnant sur toute la longueur de la voiture qui, en se relevant vers l'avant, enserrent la machine entre eux.

Il n'y a pas d'impériale ; mais il y a deux plates-formes, l'une immédiatement derrière la machine, dont elle est séparée par une cloison garnie d'amiante, l'autre à l'arrière de la voiture. Le compartiment fermé se trouve entre ces deux plates-formes.

Le nombre de places offertes est de 43 (21 sur les plates-formes, 22 à l'intérieur). La longueur totale de la voiture est de 9,30 m., sa largeur de 2 m. et la distance de l'essieu d'arrière à l'axe du bogie d'avant est de 5,68 m.

Le poids total de la voiture en charge est de :

Caisse.	3 500 kg.
Châssis, moteur et bogie.	8 000
Total.	11 500 kg.
43 voyageurs et 2 agents à 70 kg	3 150 kg.
soit au total.	14 650 kg.

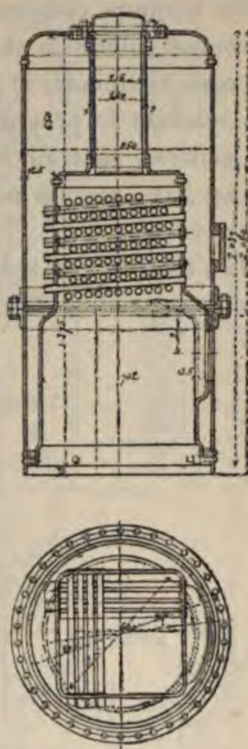
La chaudière (fig. 5) est verticale. L'enveloppe extérieure est cylindrique et composée de deux parties réunies par des boulons. La partie supérieure peut s'enlever pour permettre le nettoyage.

Le foyer, cylindrique à sa partie inférieure, se termine à sa partie supérieure par un parallélipipède de forme rectangulaire dont les parois opposées sont réunies par des tubes faiblement inclinés ; l'eau circule à l'intérieur de ces tubes et les gaz chauds à l'extérieur.

Les tubes, au nombre de 131 et d'une épaisseur de 5 mm. ont un diamètre extérieur de 38 mm. ; ils sont vissés dans les deux plaques. D'une longueur de 0,565 m. ils ont une surface de chauffe de 8,83 m². La surface du foyer étant de 1,62 m², la surface de chauffe totale est de 10,45 m² (on vient de construire des voitures de ce type

qui ont 13 m² de surface de chauffe). La surface de grille est de 0,45 m², avec barreaux en fonte à écartement de 10 mm. Le timbre de la chaudière est de 16 kg.; son volume d'eau est de 400 litres et celui de la vapeur de 270 litres.

La vaporisation dans ces chaudières est active ; elles fonctionnent généralement avec le tirage naturel, mais lorsqu'on emploie le souffleur, on peut obtenir une vaporisation de 90 kg. d'eau par mètre carré de surface de chauffe.


Fig. 5. — Chaudière.

On emploie comme combustible du coke de bonne qualité qu'on charge sur la grille par couche de 0,30 m. à 0,35 m. d'épaisseur. Ce chargement se fait au moyen de pelles allongées et étroites contenant 4,60 kg. de charbon et trois ou quatre de ces chargements suffisent pour un voyage aller et retour, dans le cas d'une ligne à résistance moyenne.

Le lavage de la chaudière se fait généralement après un parcours de 600 kil. et le nettoyage des tubes, qui s'opère un peu plus souvent, se fait au moyen d'un tube en caoutchouc prenant la vapeur soit dans la chaudière à nettoyer, soit dans la machine de réserve, dans le cas ou la première ne serait pas en pression.

L'alimentation de la chaudière devant se faire, comme nous le verrons plus loin, avec de l'eau de condensation à une température assez élevée, on se sert de l'injecteur Kœrting ou même d'une pompe.

Généralement, avant le départ, le mécanicien remplit sa chaudière à un niveau élevé, de sorte qu'il peut faire son voyage aller et retour sans alimentation, ceci, bien entendu, dans le cas ou des rampes exceptionnelles ne se rencontrent pas sur le trajet ou que des charges supplémentaires ne sont pas ajoutées à la charge normale. Au moment du départ, la pression doit être celle du timbre

de la chaudière. En sortant de la chaudière, la vapeur est un peu surchauffée par son contact avec le tuyau des gaz de combustion.

Le régulateur de prise de vapeur est vertical et placé à la partie supérieure de la chaudière. C'est avec lui qu'on règle les variations d'effort à produire, l'admission de la vapeur dans les cylindres étant toujours conservée constante, à 30 p. 100, valeur qui a été reconnue comme la plus avantageuse. En cas de nécessité, on peut du reste augmenter la pression d'admission au moyen du souffleur, en relevant la pression dans la chaudière à son maximum, car en général, sauf au départ, la pression se maintient entre 8 et 10 kg., la pression maximum de 16 kg. étant conservée comme réserve.

Les figures 6, 7, 8 donnent le schéma de l'appareil moteur, ainsi que la disposition d'ensemble de la chaudière et du mécanisme.

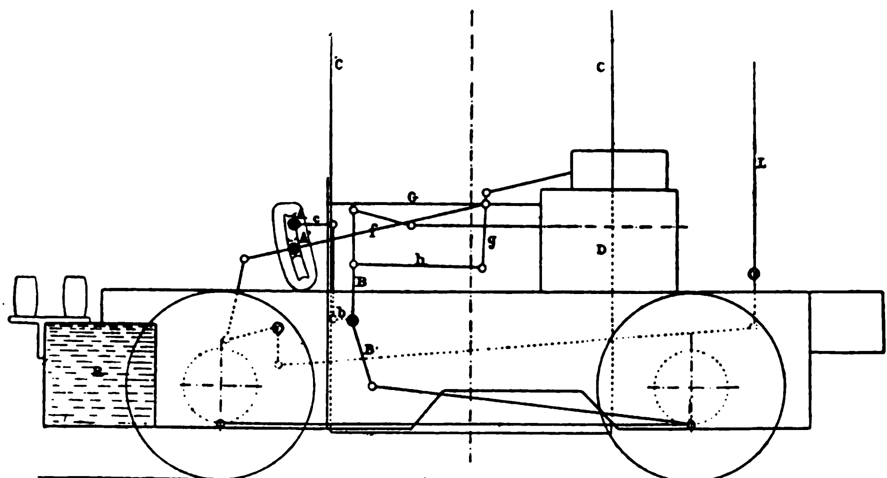


Fig. 6.

Les cylindres sont horizontaux et placés sur la plate-forme.

Données principales :

Cylindres.	diamètre	0,166 m.
	course	0,340 m.
Diamètre des roues motrices		0,620 m.
Écartement des essieux		1,540 m.
Pression dans la chaudière		14 kg.
Rapport des bras de levier		3 à 2
Effort de traction théorique		2 115 kg.

La transmission du mouvement aux roues motrices se fait au moyen d'un balancier dont les bras de levier sont dans le rap-

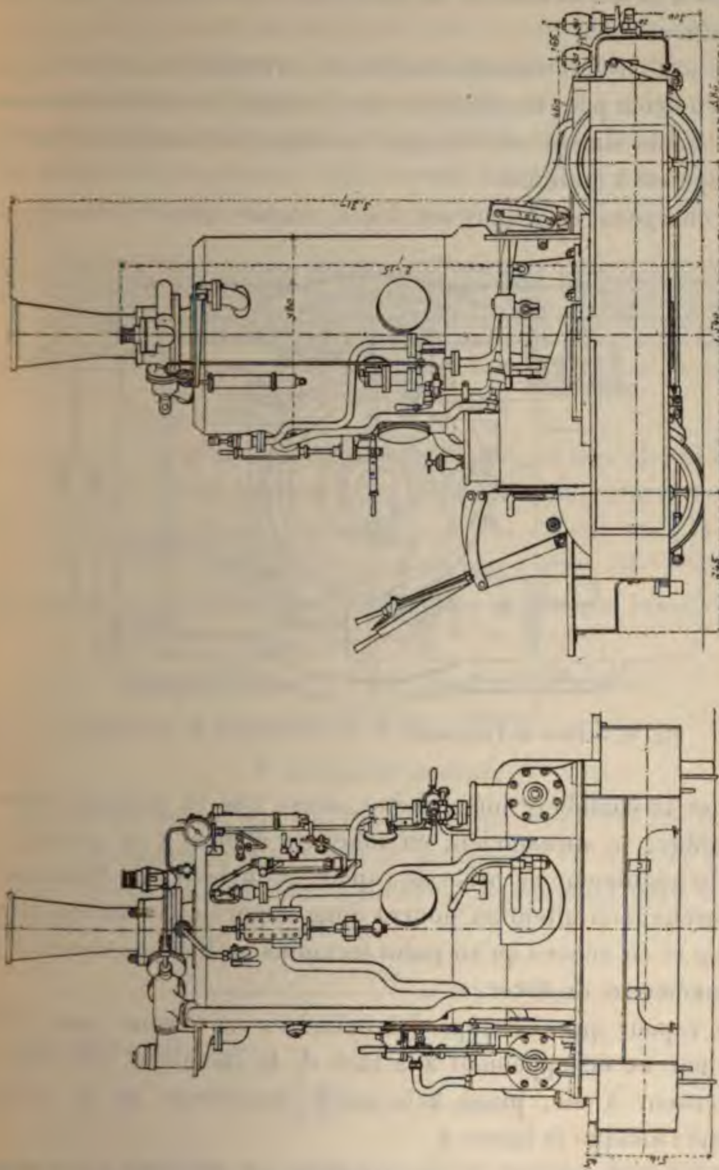


Fig. 7. — Ensemble de la chaudière et du mécanisme moteur.

port de 3 à 2. Quant à la distribution, elle est du système Brown employé pendant longtemps par l'usine Winterthur. Assez com-

pliquée par elle-même, elle offre certains inconvénients, surtout celui de paralyser l'action de la machine lorsque une avarie se produit à la distribution d'un des cylindres, ces deux distributions se commandant.

Une sablière est installée sur le bâti du moteur et un levier, que le mécanicien peut manœuvrer avec le pied, permet de faire tomber le sable sur la voie lorsque le temps est humide et que le patinage est à craindre.

En chargeant au départ son foyer, comme nous l'avons dit plus

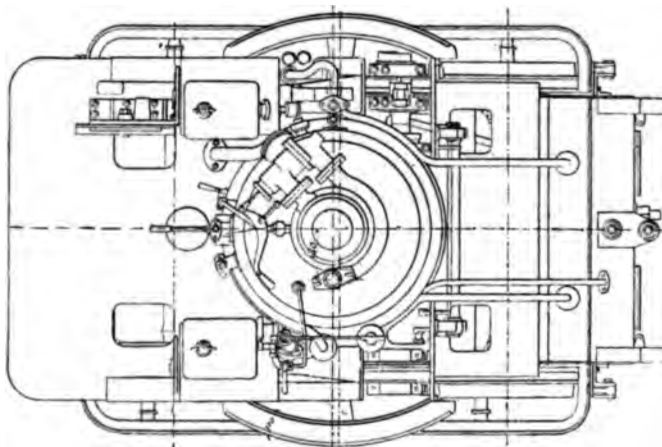


Fig. 8. — Plan de l'ensemble de la chaudière et du mécanisme.

haut et la chaudière bien pleine, ainsi que la pression voisine du timbre, le mécanicien, en marche, n'aura à se préoccuper que du régulateur de prise de vapeur et du levier de changement de marche; son attention pourra donc se porter exclusivement sur la voie et ce ne sera qu'au point terminus qu'il devra s'occuper de la chaudière et du foyer.

La vapeur qui s'échappe des cylindres est évacuée soit à l'air libre par un échappement à la base de la cheminée, soit dans un condenseur à air, placé à la partie supérieure de la voiture, comme l'indique la figure 4.

Ce condenseur (fig. 9) est composé de 24 éléments comprenant chacun 9 tubes de 20 mm. de diamètre; sa surface est de 80 m² (dans les derniers types, cette surface atteint 130 m²).

C'est cette dernière marche qui est employée d'une façon régulière. Elle a pour avantage d'éviter les projections d'eau et de vapeur très préjudiciables pour les voyageurs. L'eau de condensation, amenée dans une bâche placée sous la plate-forme, sert à l'alimentation de la chaudière ; on obtient ainsi une économie notable ; deplus les renouvellements d'eau sont diminués, ce qui permet des parcours plus longs. En hiver, l'eau chaude passe dans l'intérieur des voitures et les chauffe. Si le moteur travaille à son maximum



Fig. 9. — Condenseur.

de puissance ou si la température ambiante est très élevée il peut se faire que la condensation de la vapeur d'échappement se fasse très difficilement. Dans ce cas, on envoie la vapeur sous la grille dans un anneau cylindrique percé de trous, d'où elle s'échappe, après avoir traversé le foyer, surchauffée et presque invisible.

TRAVAIL MOYEN ET DÉPENSE DE CHARBON PAR KILOMÈTRE-VOITURE

1° *Automotrice seule.*

En nous reportant aux chiffres que nous avons indiqué comme base et en prenant comme poids de la voiture 14,7 t., nous aurons comme travail par kilomètre-voiture, en adoptant 0,80 comme rendement de l'appareil moteur :

$$\frac{14,7 \times 17,5 \times 1\,000}{0,80} = 321\,562 \text{ kgm}$$

soit en chevaux-heures :

$$\frac{321\,562}{270\,000} = 1,19 \text{ chev.}$$

On peut admettre une consommation de coke de 2,5 kg. par cheval-heure ; la consommation par kilomètre-voiture sera donc :

$$1,19 \times 2,50 = 2,98 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

Le travail par kilomètre-voiture dans les cylindres sera :

$$321\ 562 + \frac{12,5 \times 9 \times 1000}{0,80} = 462\ 187 \text{ kgm.}$$

soit en chevaux :

$$\frac{462\ 187}{270\ 000} = 1,71 \text{ chev.};$$

et la consommation de charbon par kilomètre-voiture sera de :

$$1,71 \times 2,50 = 4,27 \text{ kg.}$$

TRAVAIL MOYEN A LA VITESSE DE 12 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule.*

La résistance dans les cylindres sera de :

$$\frac{14,70 \times 17,5}{0,80} = 321,56 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{321,56 \times 3\ 33}{75} = 14,30 \text{ chev.}$$

Avec l'admission normale de 30 p. 100 dans les cylindres, la pression dans la chaudière devra être de :

$$p = \frac{322 \times 62}{0,55 \times \overline{16,6}^2 \times 34} = 3,86 \text{ kg.}$$

Diamètre des roues motrices	0,620
— des cylindres.	0,166
Course des pistons	0,340
Coefficient de réduction pour l'admission de 30 p. 100.	0,55

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans les cylindres sera de :

$$321,56 + \frac{12,5 \times 9}{0,8} = 462,19 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{462,19 \times 3,33}{75} = 20,60 \text{ chev.}$$

Avec une admission de 30 p. 100, la pression dans la chaudière sera :

$$p = \frac{462 \times 62}{0,55 \times \overline{16,6}^2 \times 34} = 5,54 \text{ kg.}$$

TRAVAIL SUR UNE RAMPE DE 50 MILLIMÈTRES AVEC UNE VITESSE DE 5 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule.*

La résistance dans les cylindres sera de :

$$\frac{(13,50 + 50)\ 14,70}{0,80} = 1167 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{1167 \times 1,39}{75} = 21,70 \text{ chev.}$$

Avec une admission normale de 30 p. 100 la pression dans la chaudière devra être de :

$$p = \frac{1167 \times 62}{0,55 \times \overline{16,6}^2 \times 34} = 14 \text{ kg.}$$

Il y aurait dans ce cas avantage à augmenter de quelques centièmes l'admission dans les cylindres.

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans les cylindres sera de :

$$1167 + \frac{8,5 \times 9}{0,80} = 1693,5 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{1693,5 \times 1,39}{75} = 31,20 \text{ ch.}$$

Si nous conservons la même admission, de 30 p. 100, dans le cylindre, la pression devra être de :

$$p = \frac{1693 \times 62}{0,55 \times \overline{16,6}^2 \times 34} = 20,32 \text{ kg.};$$

c'est-à-dire supérieure au timbre de la chaudière. Ce ne serait

qu'avec une pleine admission de 80 p. 100 que le moteur pourrait produire l'effort nécessaire avec le timbre de 16 kg. dans la chaudière. En cas de démarrage, le moteur serait donc insuffisant sur la rampe de 50 mm.

Du reste les automotrices dont nous venons de parler sont destinées à desservir une ligne où les rampes sont modérées et inférieures à 50 mm.; elles sont donc, dans ce cas, parfaitement suffisantes.

Il est cependant bon d'ajouter que la Compagnie générale des Omnibus, en prévision de ces cas exceptionnels, a fait étudier et construire des automotrices plus puissantes. Les chaudières plus fortes sont à deux corps verticaux, timbrées à 18 kg. au lieu de 16, et les diamètres des cylindres ont été augmentés.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Les dépenses de traction par kilomètre-voiture peuvent s'établir comme il suit. Elles s'appliquent à un service de traction dans Paris et sont basées sur des relevés faits très exactement et pendant plusieurs mois.

Nous ferons remarquer que la consommation de charbon qui est admise dans ces prix de revient est celle résultant de la traction sur une ligne où la résistance moyenne est de 17,50 kg., *chiffre que nous avons pris partout comme base dans nos calculs de prix de revient.*

La dépense afférente au combustible variera donc en plus ou en moins suivant que cette résistance moyenne sera > ou < que 17,50 kg., et il y aura lieu d'en tenir compte dans chaque cas considéré.

Combustible : 2,98 kg. à 0,040 le kg.	0,119 fr.
Huile, graissage et eau	0,017
Réparation et entretien du matériel roulant, des moteurs, ateliers, personnel des ateliers et matières.	0,110
Salaire des mécaniciens	0,080
Divers et imprévus.	0,020
Dépense de traction par kilomètre-voiture. .	0,346 fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il faut ajouter les dépenses dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 kilomètres ayant 30 voitures dont 20 en service parcourant chacune 150 kilomètres par jour, peut s'établir comme il suit :

Outillage des ateliers.	35,000 fr.
Bâtiments des dépôts et ateliers	150,000
Prises d'eau supplémentaires	25,000
30 voitures à 30 000 fr.	900,000
Total	1 110 000 fr.

Ce qui représente pour un parcours annuel de 1 000 000 de km., une dépense de :

$$\frac{1\,110\,000 \times 0{,}1}{1\,000\,000} = 0{,}11 \text{ fr.}$$

La dépense totale de traction par kilomètre-voiture s'élèvera donc à : 0 fr. 346 + 0 fr. 110 = 0 fr. 456.

SYSTÈME SERPOLLET

Le système Serpollet a été appliqué pour la première fois à la traction en décembre 1893. Cette première application a été faite sur le réseau des tramways de Paris et du département de la Seine, entre la Porte Maillot et Saint-Denis. A la suite de ces essais, il a été appliqué définitivement sur le même réseau, entre la Madeleine et Gennevilliers et la Madeleine et Colombes.

On le retrouve également, soit à l'état définitif soit à l'état d'essais, sur les réseaux des tramways de Saint-Etienne, Tours, Cherbourg, Lille, Marseille, Gérardmer, Genève, Haïti, le Brésil et à la Compagnie générale des Omnibus de Paris.

Des voitures automotrices de ce système circulent sur les chemins de fer de l'Etat wurtembergeois. La Compagnie du Nord

en fait également construire pour des besoins spéciaux. Enfin, les chemins de fer secondaires allemands et autrichiens en étudient l'application pour quelques-unes de leurs lignes.

Le côté tout à fait original de ce système est sa chaudière. En fait, cette chaudière est du type multitubulaire à circulation d'eau, mais l'espace intérieur réservé à cette circulation est réduit à sa plus extrême limite. L'eau passe dans une fente étroite au milieu d'un gros tube chauffé dans un foyer et y est refoulée par une pompe alimentaire. En présence de ce laminage, la vaporisation se fait instantanément et cette vapeur surchauffée est ensuite dirigée vers les cylindres moteurs. La vaporisation est d'autant plus active et la pression d'autant plus élevée que la quantité d'eau circulant dans les tubes est plus grande ; de là une certaine élasticité et la facilité de faire face aux efforts variables à produire.

La forme à donner aux tubes était une question très délicate que l'expérience seule pouvait déterminer. A la suite de nombreux essais, on s'est arrêté à la disposition suivante : on prend un tube cylindrique en acier qu'on étampe pour lui donner la forme en U renversé indiquée par la figure 10. Au milieu de sa longueur on ménage une partie étirée qu'on replie sur elle-même et, aux deux extrémités, on réserve également deux parties étirées et filtées. On obtient ainsi *un élément* de chaudière (fig. 11) et en réunissant, au moyen de raccords spéciaux à



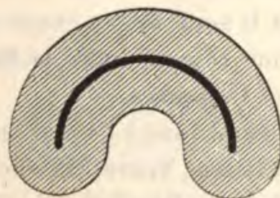


Fig. 10.

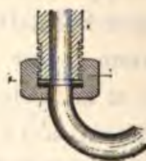


Fig. 11.

écrous, un certain nombre d'éléments, on forme une chaudière dont la surface de chauffe dépendra du nombre des éléments

(fig. 12). Quant à l'espace réservé pour la circulation de l'eau, il varie de 2 à 5 mm., suivant la distance des éléments aux points d'admission de l'eau, le plus grand espace étant réservé aux tubes les plus éloignés afin de diminuer la perte de charge due aux frottements. Ces éléments sont timbrés à la pression de 94 kg., mais la pression maximum de marche pour les tramways ne dépasse jamais 25 kg. qui est inférieure à la pression que peuvent supporter les cylindres qui sont essayés à 35 kg.

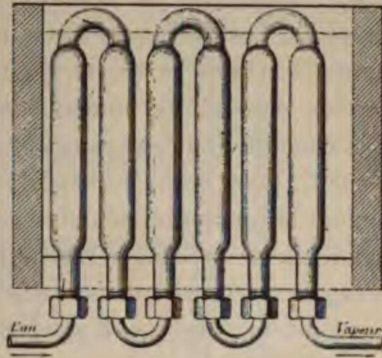


Fig. 12.

Une autre caractéristique du système Serpollet, c'est la disposition des appareils de manœuvre.

Dans les premières voitures, la distribution se faisait de la

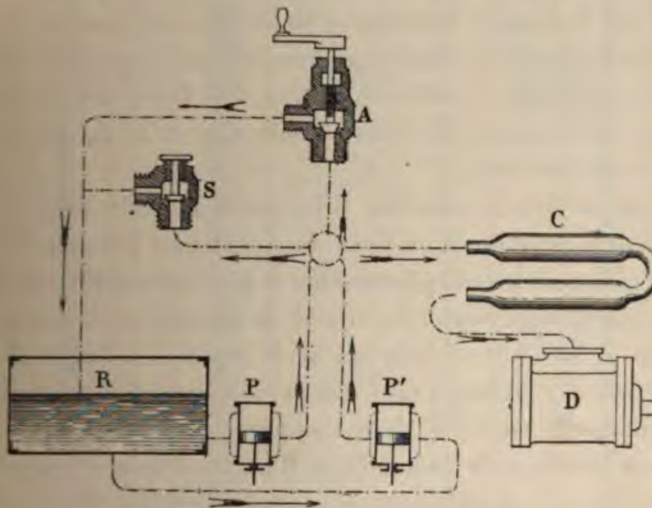


Fig. 13. — Schéma des appareils de manœuvre.

manière suivante : soit C (fig. 13) le générateur, D le cylindre moteur, R un réservoir d'alimentation, S une soupape de sûreté, P' une pompe d'alimentation à main, P une pompe d'alimentation

automatique, mise en marche par un excentrique calé sur l'essieu moteur.

Si, au moment du départ, on met en marche à la main la pompe P', l'eau est immédiatement refoulée dans le générateur C. comme l'indique la flèche, se vaporise et le moteur se met en marche. Aussitôt la pompe automatique P fonctionne, par suite de la rotation de l'essieu moteur et l'eau est refoulée dans le générateur C, puis, après sa vaporisation, dans le cylindre moteur D. Comme la pompe alimentaire est calculée pour injecter dans la chaudière la quantité d'eau utile pour la production maximum de vapeur nécessaire dans les circonstances les plus difficiles, soit pour les démarrages, soit sur les rampes les plus fortes, on obtiendra ainsi l'effort maximum du moteur. Dans cette circonstance. le pointeau régulateur A qui est sous la main du mécanicien, est fermé et l'eau refoulée par la pompe ne peut le traverser.

Si l'effort à produire vient à diminuer et qu'il faille, par conséquent, diminuer la production de vapeur et sa tension, il suffit d'ouvrir tant soit peu le pointeau régulateur ; une partie de l'eau refoulée par la pompe continue à se rendre au générateur et le surplus, traversant le pointeau, retournera au réservoir R, comme l'indique la flèche. Cette répartition de l'eau de circulation dépendra évidemment de l'effort à produire et le mécanicien en disposera à sa volonté.

S'il veut arrêter le véhicule, il lui suffit d'ouvrir suffisamment le pointeau régulateur A et l'eau de circulation retourne directement au réservoir R sans passer dans le générateur. En ouvrant en grand le pointeau, l'eau et la vapeur du générateur retournent au réservoir et on obtient ainsi un arrêt rapide, en joignant à cet effet l'action des freins. Une soupape de sûreté S est placée sur la conduite ; elle est réglée pour une pression de 20 kg., pression maximum admise dans la chaudière. Dans les derniers types de voitures, l'alimentation se fait comme nous le décrirons plus loin pour la voiture des chemins de fer wurtembergeois.

Nous venons de donner le principe essentiel du système Serpollet ; nous allons maintenant en montrer l'application, en prenant comme type les voitures qui font le service entre la Madeleine et Gennevilliers.

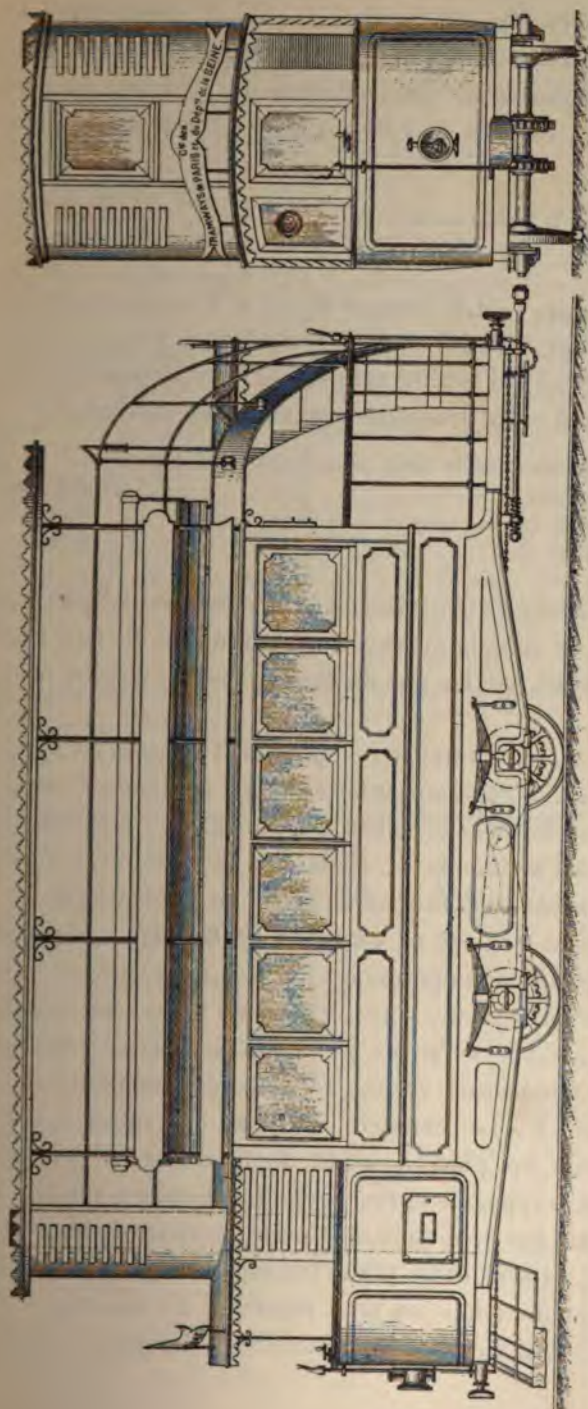


Fig. 14. — Voiture Serpollet de la Compagnie des tramways Nord de Paris.

Ces voitures (fig. 14) sont à impériale couverte, à 50 places (20 à l'intérieur, 24 à l'impériale et 6 sur la plate-forme); elles sont construites pour voie normale de 1,44 m. et portées sur deux essieux espacés de 1,90 m. La longueur totale de la caisse est de 8 m.

Le poids à vide est de	11,500 kg.
— en charge est de.	14,800 —

Générateur. — Les figures 15, 16 et 17 donnent la disposition du générateur installé sur la plate-forme avant de la voiture, contre la paroi qui sépare celle-ci du compartiment réservé aux voyageurs ; il a les dimensions extérieures suivantes :

Longueur dans le sens transversal à l'axe de la voiture.	1,774 m.
Largeur dans le sens de l'axe de la voiture . . .	0,894 —
Hauteur	1,260 —

Il est composé de deux faisceaux, l'un horizontal placé au-dessus de la grille et soumis au rayonnement direct du feu, l'autre vertical et chauffé par les gaz de la combustion qui se rendent à la cheminée.

Le faisceau horizontal se compose de 3 rangées de tubes et de 9 éléments ; les 3 éléments inférieurs qui subissent l'action directe du feu sont formés de tubes concentriques, ces tubes résistant mieux sous l'action de la chaleur à la pression intérieure ; les autres éléments sont formés de tubes en U renversé.

Le faisceau vertical se compose de 8 rangées de tubes et de 23 éléments. Les deux premières rangées, qui reçoivent directement l'action des gaz chauds, sont formées de tubes concentriques et la dernière, avant la sortie de la vapeur se rendant aux cylindres, de tubes cylindriques creux ; le reste des éléments se compose de tubes en U. Le mandrin intérieur des tubes concentriques est maintenu en place à l'aide de trois ergots indiqués sur la figure 18 et rapportés après coup. La dernière rangée de tubes creux a pour but de diminuer la perte de charge résultant du passage de la vapeur dans toute la longueur du générateur et de former en même temps un petit réservoir de vapeur.

Les tubes sont disposés en quinconce, de manière à bien chicaner

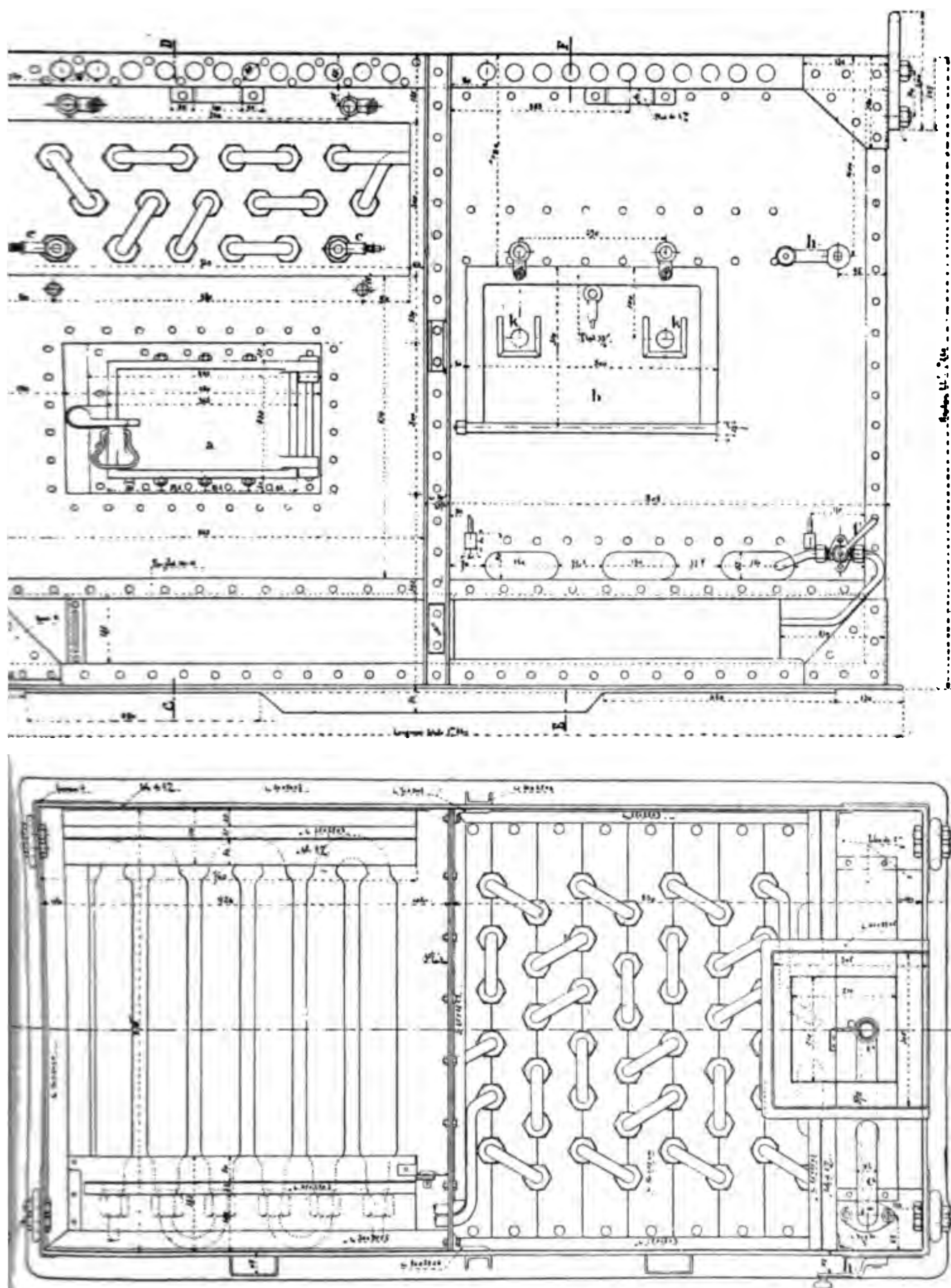


Fig. 15. — Générateur Serpollet. — Elévation et plan (couvercle enlevé)

les gaz dans leur passage et leur espacement d'axe en axe est de 101 mm. ; leur longueur au feu est de 0,55 m.

La figure 18 donne les dimensions adoptées pour les trois types de tubes.

Les raccords qui réunissent entre eux les différents éléments

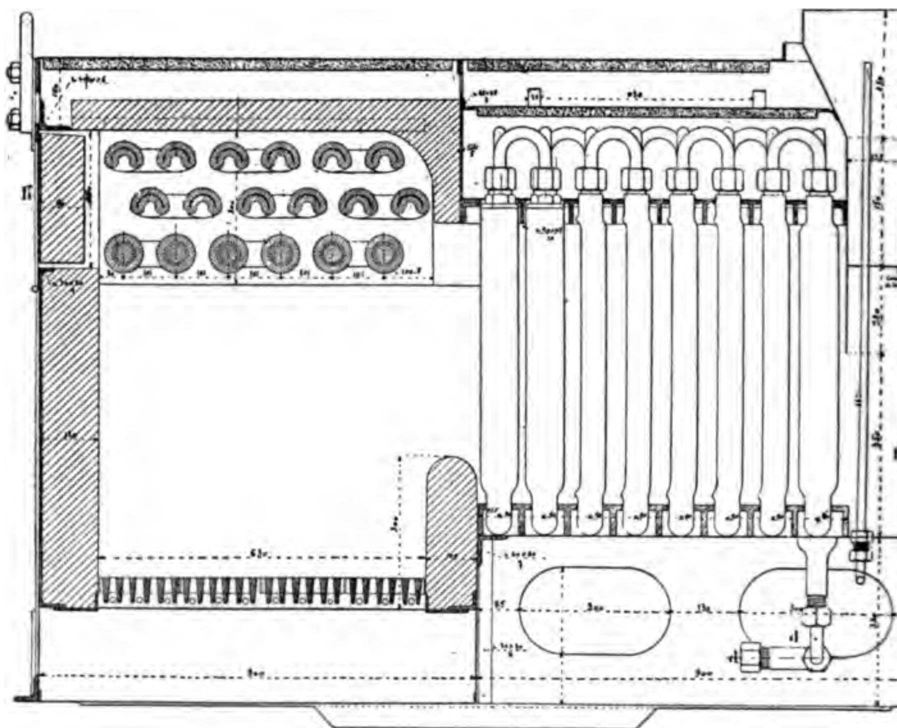


Fig. 16. — Générateur Serpollet. — Coupe longitudinale.

sont placés extérieurement au générateur, de façon à ce qu'ils ne reçoivent pas l'action directe du feu ou des gaz chauds et aussi pour faciliter la réparation ou le nettoyage de ceux-ci.

Une enveloppe en tôle mince munie intérieurement de matières réfractaires entoure la chaudière. Contre cette première enveloppe s'en trouve une seconde également en tôle mince, garnie d'amiante, destinée à éviter les pertes de chaleur dues au rayonnement. Ces deux enveloppes sont isolées, et entre elles, circule un courant d'air qui vient augmenter le refroidissement; il

est activé par l'échappement de la vapeur des cylindres dans la cheminée avec laquelle cet espace libre communique.

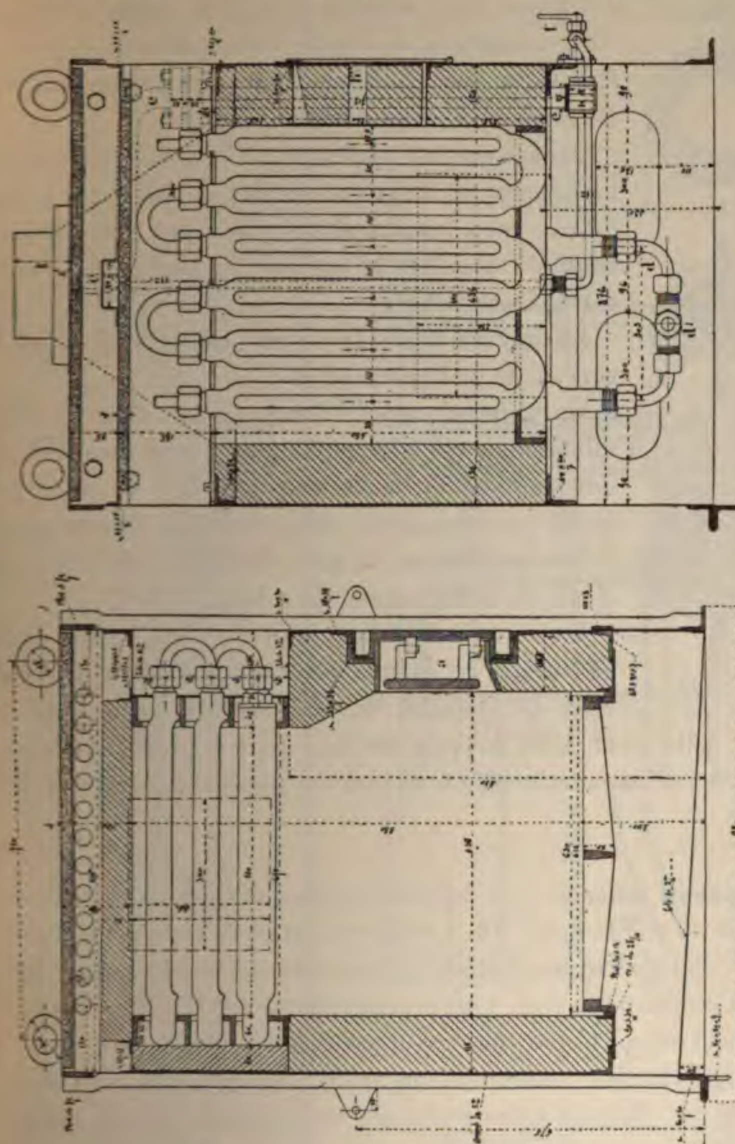
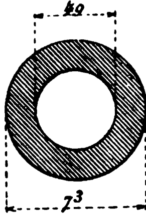


Fig. 17. — Générateur Serpollet.

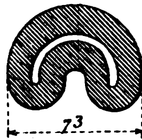
La cheminée du générateur est également à double enveloppe garnie d'amiante et vient déboucher au niveau de la toiture de l'impériale.

Des ouvertures, munies de portes, sont ménagées dans extérieures du générateur, afin de permettre le nettoyage



des tubes, leur réparation ou leur rempl elles permettent de laisser entrer dans le l'air froid, pour diminuer le tirage et la pı de vapeur en cas de besoin.

Dans le cas, au contraire, où le tirage pr l'échappement de la vapeur des cylindres fisant, dans les coups de collier par exe souffleur placé à la base de la cheminé d'activer ce tirage.



La surface totale de chauffe est de 8,35 surface de grille de 0,40 m².

En général, avec l'échappement dans minée mais sans le souffleur, on peut coı une combustion d'environ 110 kg. de mètre carré de surface de grille et par heu à la vaporisation, on peut l'admettre de d'eau par kilogramme de coke.

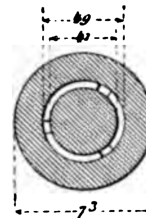


Fig. 18.

La vaporisation par heure et par mè de surface de chauffe varie entre 30 et 80 vant la quantité de combustible brûlé grille ; elle peut aller jusqu'à 90 kg. dans les cas e cette vapeur est surchauffée à sa sortie à une températuı à 350°.

Appareil moteur. — L'appareil moteur des premiers représenté par la figure 19. Les figures 20 et 21 représen plus de détails l'appareil étudié et construit récemment pa nier. Comme on le voit, tout le mouvement est intérieuı gerons et supporté par des traverses en fer reliées à ceux

Deux cylindres actionnent un arbre intermédiaire av velles à 90°. Sur cet arbre sont fixés trois pignons dentés leur rotation entraînent, au moyen de chaînes, l'essieu d l'essieu d'arrière. Les pignons calés sur les essieux sont mètre plus grand que ceux calés sur l'arbre intermédiair port est tel que les essieux tournent 2,5 fois moins vite q

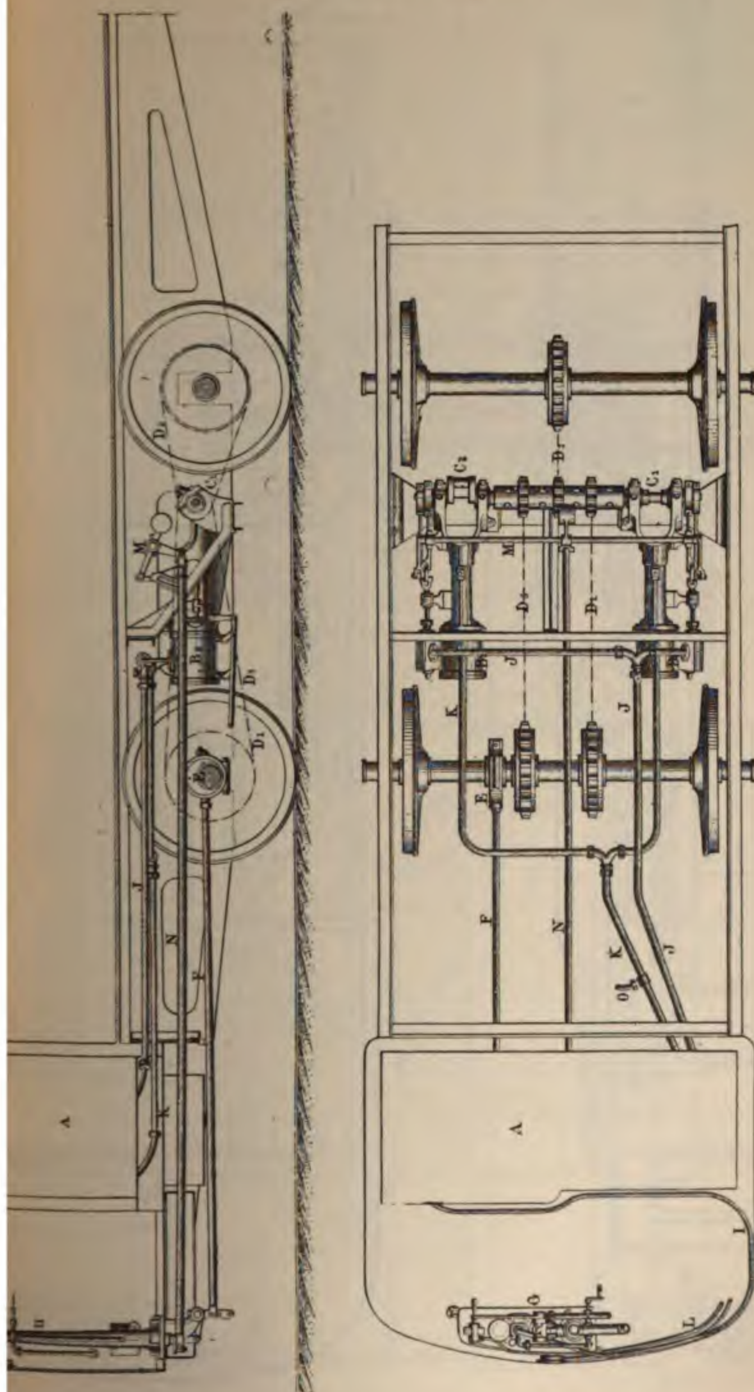
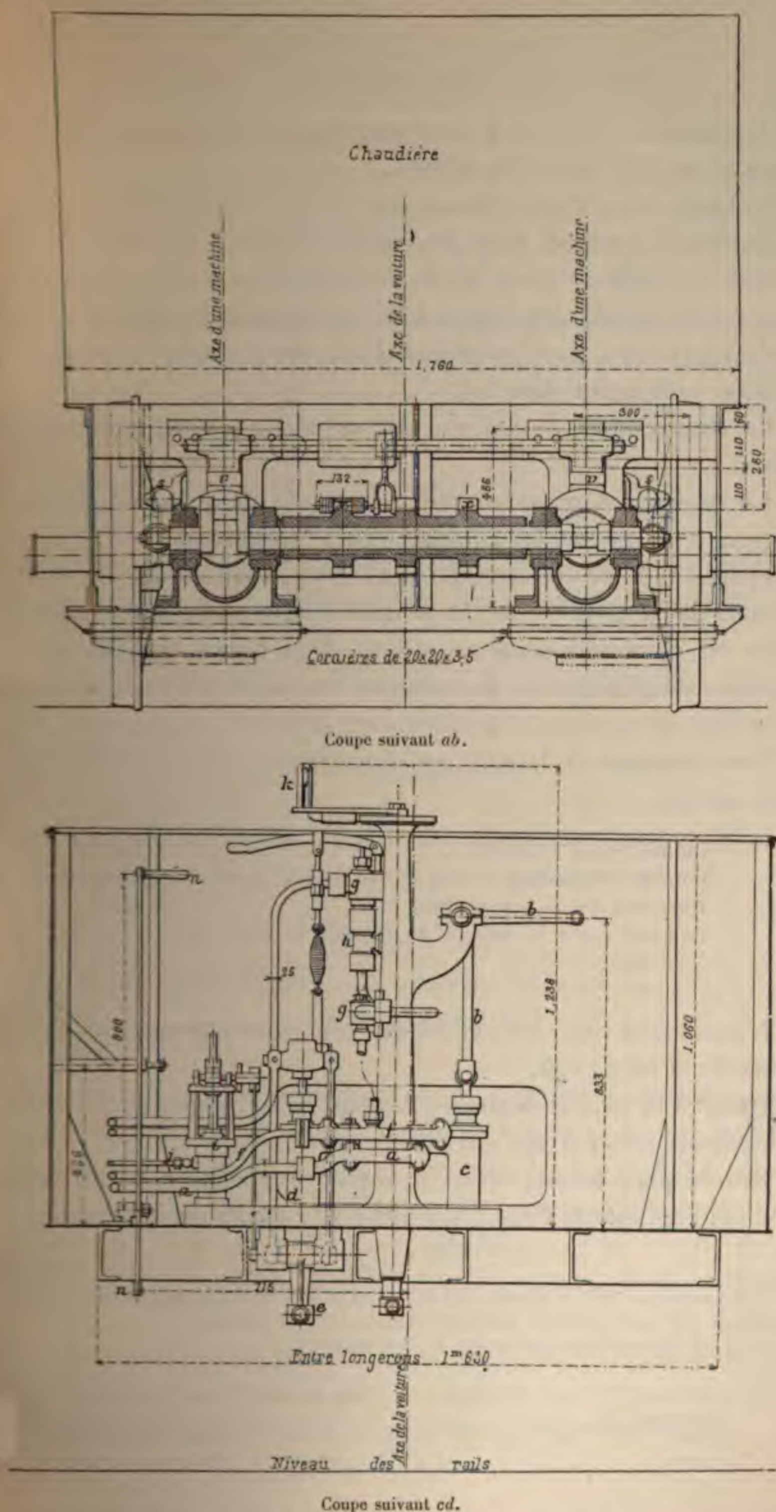


Fig. 19. — Appareil moteur. — Premier type.

Alimentations
Chaudière
Échappement
Prise de vapeur
Cendrier
870
180
1.100
Axe des machines
Longueur totale du chassis = 8m 467
1 300
Porte
Conduite d'appel des purgeurs d'huile
Contour de la tôle de l'enveloppe
Contour de la Carrosserie
Contour de l'encombrem. des chaînes
Commande des purgeurs
Prise de vapeur du manomètre
Tuyau de graissage
Axe de la voiture
Entre longerons - 1.630
350
350
AR
AV



Coupe suivant *ab*.

Coupe suivant *cd*.

Fig. 21. — Appareil moteur. — Dernier type.

de la machine motrice. A la vitesse de 12 kilomètres à l'heure, le moteur fait 195 tours à la minute.

L'emploi de la chaîne donne une certaine élasticité au système et facilite le passage dans les courbes ; mais il y a lieu de tenir compte des allongements qui se produisent en service et, de plus, ce système n'est guère applicable aux vitesses dépassant 25 kilomètres à l'heure, pour lesquelles il faut alors recourir aux moteurs ordinaires à action directe[1].

Le changement de marche est obtenu au moyen d'une coulisse.

La vapeur est graissée avant son entrée dans les cylindres, au moyen d'un graisseur automatique à compression. Enfin, tout l'appareil moteur est enfermé dans une caisse en tôle le mettant à l'abri de la boue et de la poussière. De plus, cette caisse est mise en communication au moyen d'un tuyau en tôle avec le cendrier du générateur, de sorte que les vapeurs d'huile sont aspirées dans ce cendrier et brûlées dans le foyer.

Nous donnons ci-dessous les dimensions principales de l'appareil moteur :

Diamètre des cylindres	0,160	m.
Course des pistons	0,150	—
Diamètre des roues motrices	0,820	—
Rapport entre la vitesse du moteur et celle de l'essieu	2,5	—

L'admission dans les cylindres, généralement employée, varie entre 50 et 55 p. 100.

Quant à la vapeur dépensée dans les cylindres par cheval-heure, elle paraît être de 9 kg. environ.

Sur la plate-forme, et en avant de la chaudière, se trouvent, comme l'indique la figure, les différents appareils de manœuvre:

[1] Des moteurs à action directe ont été montés dernièrement sur des automotrices circulant sur les tramways de Cherbourg, de Lille et de Haïti.

Voici les dimensions principales de ces moteurs :

	Diamètre des cylindres.	Course.	Diamètre des roues motrices.
Cherbourg	0m,175	0m,250	0m,650
Lille	0m,170	0m,300	0m,750
Haïti	0m,175	0m,250	0m,650

le pointeau régulateur, ou la soupape équilibrée qui, comme nous l'avons dit au début, servent à régler l'effort à produire, la pompe à main pour le démarrage, la manœuvre du changement de marche, le frein et enfin la pompe d'alimentation automatique actionnée par un renvoi de mouvement mû par un excentrique fixé sur l'essieu moteur d'avant,

Cette pompe d'alimentation doit suffire à la production maximum de la chaudière ; elle est à double effet et a les dimensions suivantes ; elle aspire l'eau dans un réservoir de 350 l. de capacité, placé entre le générateur et la voiture.

Diamètre	0,05 m.
Course	0,06 —

A la vitesse de 12 km. à l'heure cette pompe pourra fournir dans le même temps, en lui supposant un rendement de 90 p. 100 :

$$\frac{2 \times 3,14 \times \overline{0,05}^2 \times 0,06 \times 0,9 \times 12\,000 \times 1\,000}{4 \times 3,14 \times 0,82} = 988 \text{ l.}$$

correspondant à :

$$\frac{988}{9} = 109 \text{ chev.-h.}$$

Nous avons indiqué au début le fonctionnement de l'appareil et sa manœuvre ; nous n'avons donc pas à y revenir.

VOITURE AUTOMOTRICE DU CHEMIN DE FER DE L'ÉTAT WURTEMBERGEOIS

Un certain nombre d'automotrices du système Serpollet ont été mises à l'essai sur différentes lignes de chemin de fer, comme nous l'avons dit plus haut ; tout récemment, les chemins de fer de l'État wurtembergeois viennent de commander une voiture de ce type, dont les essais ont été faits sur le réseau de la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée, entre Corbeil et Malesherbes.

Nous croyons intéressant de donner quelques renseignements sur cette automotrice, d'autant plus que nous y trouverons des perfectionnements de détails qui nous paraissent avoir leur valeur.

La figure 22 représente cette voiture; elle contient 44 places dont 32 assises. Destinée à circuler sur le réseau des chemins de fer wurtembergeois, elle doit pouvoir, à la vitesse de 35 km. à l'heure en palier et de 25 k. en rampe de 10 mm., remorquer une voiture pesant 13 t. en charge.

Cette voiture a une longueur totale de 9,50 m. sans les tampons et une largeur de 2,828 m. ; l'espacement des essieux est de 4,00 m.

Le poids total à vide est de 17 400 kg. et en charge, avec 44 voyageurs, de 20 500 kg. répartis comme il suit :

Essieu d'avant	12 500 kg.
— d'arrière	8 000 —
Total	20 500 kg.

Le générateur, placé sur la plate-forme avant, a une largeur de 1,11 m. dans le sens perpendiculaire à l'axe de la voiture, une longueur de 0,79 m. dans le sens longitudinal et une hauteur totale de 1,90 m. jusqu'à la naissance de la cheminée. Il est formé de deux faisceaux (fig. 23) de tubes juxtaposés, mais distincts, placés au-dessus du foyer. Ici, toutes les tubulures sont disposées horizontalement et en quinconce. Deux rangées de quatre tubulures, avec tubes concentriques, sont installées au-dessus du foyer; au-dessus 8 rangées de quatre tubulures avec tubes en U et, enfin, la dernière rangée avec tubes creux occupe la partie supérieure ; les dimensions de ces tubes sont celles que nous avons indiquées plus haut.

L'eau à vaporiser est introduite dans la rangée inférieure et l'eau vaporisée sort par les tubes creux de la rangée supérieure.

La surface totale de chauffe de l'ensemble des deux faisceaux est de 11,132 m²., et la grille qui se trouve à 0,70 m. au-dessous des tubes a une surface de 0,46 m².

L'appareil moteur est à l'avant de la voiture au-dessous de la plate-forme. Les cylindres extérieurs, boulonnés sur un longeron fixé au moyen de cornières au bâti de la voiture, actionnent *directement*, au moyen de bielles et de manivelles l'essieu d'avant. La distribution est du système Walschaërt.

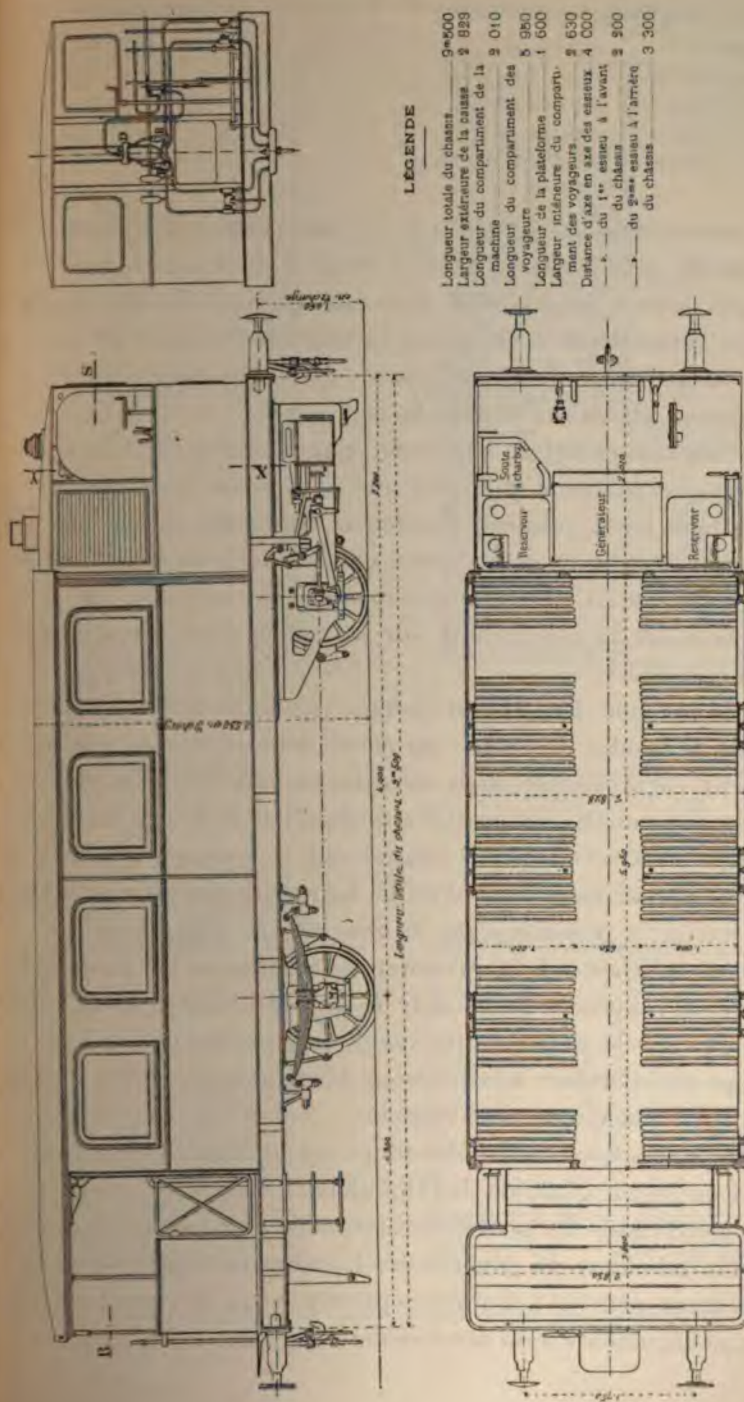


Fig. 22. — Voiture automotrice de l'Etat wurtembergeois.

Les dimensions principales de l'appareil moteur sont les suivantes :

Diamètre des cylindres	0,210 m.
Course des pistons	0,300 —
Diamètre des roues motrices	1,000 —

L'alimentation du générateur se fait comme d'ordinaire, au moyen de deux pompes, l'une à main, l'autre automatique. Ces pompes sont à double effet avec un diamètre de 50 mm. ; la pompe automatique est à course variable de 50, 60 et 70 mm.

Ces deux pompes aspirent l'eau de deux réservoirs latéraux au générateur, placés sur la plate-forme.

Le fonctionnement de l'appareil, comme démarrage ou marche normale, est le même que celui que nous avons décrit précédemment. mais ici le pointeau régulateur est remplacé par une soupape qui remplit le même office que lui, mais avec une disposition différente. Comme le pointeau, cette soupape est placée sous la main du mécanicien, sur le retour d'eau vers la bâche d'alimentation.

Cette soupape (fig. 24) est chargée par un levier sur lequel un ressort à boudin F exerce un effort déterminé. La tension du ressort F est invariable, mais ce ressort est attaché à un curseur G dont la distance OG, au point d'articulation O du levier est réglable à volonté, de sorte que la charge sur la soupape augmente et diminue proportionnellement à OG. Le mécanicien peut donc ainsi faire varier la pression dans le générateur, puisque celle-ci est toujours inférieure à la pression de l'eau sous la soupape E. Lorsqu'on rapproche le curseur G de l'articulation O du levier, la charge sur la soupape diminuant, la pression de l'eau sous la soupape est inférieure à la pression du générateur et il y a retour d'eau, par la soupape, vers la bâche.

Cette disposition vient d'être adoptée pour les nouvelles voitures de la Compagnie générale des Omnibus.

Du peroxyde de fer peut se former, et cela arrive assez souvent, dans les tubulures du générateur. L'eau et la vapeur, dans leur mouvement, peuvent entraîner ce peroxyde qui viendra obstruer la soupape régulatrice dont nous venons de parler. Pour obvier à cet

Coupes horizontales du Générateur

— Plan

Fig. 23. — Générateur des automotrices de l'État wurtembergeois.

inconvénient, on a installé sur le tuyau d'alimentation du teur, à l'endroit où celui-ci se sépare du tuyau de retour

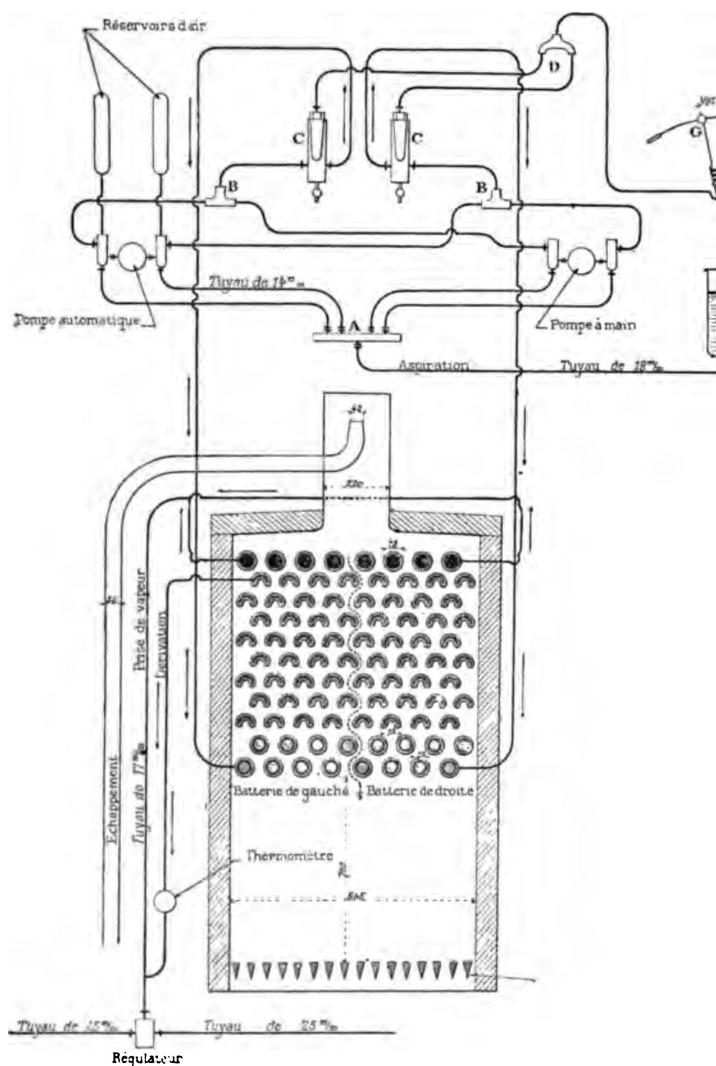


Fig. 24. — Schéma des appareils de manœuvre.

la bâche, une sorte de bouteille C contenant des tamis qui o but d'arrêter ce peroxyde de fer en l'empêchant d'arriver à pape régulatrice.

La vapeur, produite dans le générateur, doit en sortir sur-hauffée. La vaporisation doit être achevée dans la dernière angée de tubes en U. Il y a donc intérêt à s'assurer « *de visu* » ue cette surchauffe a bien lieu. Dans ce but, on a adopté pour le énérateur de la voiture de l'Etat wurtembergeois le dispositif uivant (fig. 24).

Sur la dernière rangée supérieure des tubes en U où la sur-

Fig. 25. — Pyromètre.

chauffe doit commencer, on pique un tuyau formant dérivation et faisant passer une petite portion du courant de vapeur dans

un petit cylindre où se trouve installé un pyromètre bimétallique (fig. 25), formé d'une lame d'acier et d'une lame de cuivre brasées ensemble et disposées en hélice. Sous l'influence de la chaleur, cette hélice augmente de diamètre et l'extrémité libre fait marcher une aiguille indiquant la température du courant.

Cette température ne doit pas être inférieure à 150° pour les pressions de 3 a 4 kg. dans le générateur, ni supérieure à 300° pour les pressions de 15 à 25 kg.

Des essais ont été faits avec cette automotrice, le 29 décembre 1896 et le 6 janvier 1897, sur la ligne du chemin de fer de Corbeil à Malesherbes. Ces essais ont été faits avec la voiture automotrice seule, sans remorque; le nombre des voyageurs était de 42, y compris le mécanicien; une surcharge de 400 kg. était placée sur la plate-forme arrière.

Les vitesses se sont généralement maintenues entre 35 et 40 km. à l'heure, avec une pression dans le générateur variant entre 5 et 10 kg.

Les consommations ont été de 15 litres d'eau et de 2,5 k. de charbon par kilomètre.

TRAVAIL MOYEN ET DÉPENSE DE CHARBON PAR KILOMÈTRE-VOITURE

1° *Automotrice seule.*

En prenant les chiffres que nous avons pris précédemment pour base et le poids de la voiture étant de 14,8 t., nous aurons pour la résistance par kilomètre à la jante :

$$17,5 \times 14,80 \text{ t.} \times 1\,000 = 258\,000 \text{ kgm.}$$

Comme rendement de l'appareil moteur, étant donnée la transmission par chaîne, on peut admettre le chiffre de 0,75. La résistance dans les cylindres sera par kilomètre de :

$$\frac{258\,000}{0,75} = 344\,000 \text{ kgm.}$$

soit en chevaux :

$$\frac{344\,000}{270\,000} = 1,27 \text{ chev.}$$

Nous avons dit plus haut que la quantité de vapeur à dépenser par cheval était de 9 kg, et la vaporisation par kg., de coke de 4,5 kg. La consommation de coke par kilomètre-voiture sera donc de :

$$\frac{1,27 \times 9}{4,5} = 2,54 \text{ kg.}$$

ce qui représente une consommation de $\frac{2,54}{1,27} = 2$ kg. par cheval-heure.

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans les cylindres sera de :

$$1\,000 \times \frac{17,50 \times 14,80 + 12,5 \times 9}{0,75} = 494\,000 \text{ kgm.}$$

soit en chevaux-heure :

$$\frac{494\,000}{270\,000} = 1,83 \text{ chev.}$$

La consommation de coke par kilomètre-voiture sera :

$$\frac{1,83 \times 9}{4,5} = 3,65 \text{ kg.}$$

TRAVAIL MOYEN A LA VITESSE DE 12 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule.*

La résistance dans les cylindres sera comme ci-dessus, de 344 kg. et le travail en chevaux de $\frac{344 \times 3,33}{75} = 15,20$ chev.

Nous avons dit que l'admission dans le cylindre est généralement de 0,50, admission à laquelle correspond un coefficient de réduction de 0,75 ; nous aurons donc pour la pression d'admission dans le cylindre, correspondant à la pression nécessaire dans le générateur :

$$p = \frac{0,4 \text{ DE}}{0,75\, d^2 l} = \frac{0,4 \times 0,82}{0,75 \times \overline{16}^2 \times 15} \text{ E} = 0,011 \text{ E.}$$

D = diamètre des roues motrices = 0,82 m. ;

d = diamètre du cylindre = 0,16 m. ;
l = course du piston = 0,15 ;

$$p = 0{,}011\ \text{E}.$$

Dans le cas actuel, nous aurons donc pour la pression d'ad sion :

$$p = 344 \times 0{,}011 = 3{,}76\ \text{kg}.$$

La quantité de vapeur à produire par heure sera :

$$15{,}20 \times 9 = 136{,}80\ \text{kg.};$$

et par mètre carré de surface de chauffe de :

$$\frac{136{,}80}{8{,}35} = 16{,}4\ \text{kg}.$$

La quantité de coke à consommer par heure et par mètre c de surface de grille sera donc de :

$$\frac{136{,}8}{4{,}5 \times 0{,}4} = 76{,}00\ \text{kg}.$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans les cylindres est comme ci-dessus de 494 soit en chevaux :

$$\frac{494 \times 3{,}33}{75} = 21{,}80\ \text{chev}.$$

La pression d'admission dans le cylindre sera :

$$494 \times 0{,}011 = 5{,}43\ \text{kg}.$$

La quantité de vapeur à produire par heure sera :

$$21{,}80 \times 9 = 196{,}2\ \text{kg.};$$

et par mètre carré de surface de chauffe $\frac{196{,}2}{8{,}35} = 23{,}50$ kg.

Quant à la quantité de coke, par mètre carré de surface de gı elle sera de :

$$\frac{196{,}2}{4{,}5 \times 0{,}4} = 109\ \text{kg.};$$

TRAVAIL SUR UNE RAMPE DE 50 MILLIMÈTRES PAR MÈTRE, AVEC UNE VITESSE DE 5 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule.*

La résistance dans le cylindre sera :

$$\frac{(13,5 + 50)\ 14,8}{0,75} = 1\,250 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{1\,250 \times 1,39}{75} = 23,20 \text{ chev.}$$

La pression d'admission dans le cylindre sera :

$$1\,250 \times 0,011 = 13,75 \text{ kg.};$$

et la quantité de vapeur à produire par heure de :

$$23,2 \times 9 = 208,80 \text{ kg.};$$

soit par mètre carré de surface de chauffe $\frac{208,80}{8,35} = 25,00$ kg.

La quantité de coke à consommer, par mètre carré de surface de grille, sera de :

$$\frac{208,80}{0,4 \times 4,5} = 115,50 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans le cylindre sera :

$$\frac{(13,5 + 50)\ 14,8 + (8,5 + 50)\ 9}{0,75} = 1\,960 \text{ kg.};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{1\,960 \times 1,39}{75} = 36,50 \text{ chev.}$$

La pression d'admission dans le cylindre sera :

$$1\,960 \times 0,011 = 21,56 \text{ kg.};$$

et la quantité de vapeur à produire par heure de :

$$36,50 \times 9 = 328,50 \text{ kg.};$$

soit par mètre carré de surface de chauffe : $\frac{328,5}{8,35} = 39,5$ kg.

Quant au coke à consommer par heure et par mètre carré de surface de grille, il sera de : $\frac{328,5}{0,4 \times 4,5} = 182,00$ kg.

TRAVAIL SUR UNE RAMPE DE 50 MILLIMÈTRES PAR MÈTRE, AVEC UNE VITESSE DE 5 KILOMÈTRES A L'HEURE ET DÉMARRAGE

Le démarrage devra se faire en 10 secondes pour atteindre la vitesse de 1,39 m.

1° *Automobile seule.*

Résistance due au démarrage : $\frac{V}{t}\ 102 = 102\ \frac{1,39}{10} = 14,18$ kg. ;
Résistance due à la rampe et en palier : $(13,50 + 50) = 63,50$ kg. ;

Résistance totale : 77,68 kg.

Résistance totale pour l'automotrice :
$77,68 \times 14,8 = 1158$ kg. à la jante et dans les cylindres : $\frac{1150}{0,75} = 1535$ kg. ;
correspondant à une pression dans le générateur de :

$$1\,535 \times 0,011 = 16,89 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque*

Résistance totale due au démarrage : $14,18 \times 23,80 = 338$ kg. ;
Résistance totale due à la rampe et en palier :

$(13,5 + 50)\ 14,8 + (8,5 + 50)\ 9 = 1\,467$ kg. ;

Résistance totale : 1 805 kg..

et dans les cylindres $\frac{1805}{0,75} = 2\,400$ kg. ; correspondant à une pression d'admission dans les cylindres de :

$$2\,400 \times 0,011 = 26,40 \text{ kg.}$$

Dans ce dernier cas, la pression dans la chaudière devrait être un peu supérieure à la pression maximum admise qui est de

25 kg. Pour rester dans les limites de cette pression, il serait utile d'augmenter de quelques centièmes l'admission dans les cylindres.

Dans ces calculs, nous avons admis des coefficients de réduction de pression dans les cylindres, suivant le degré d'admission, qui sont ceux employés pour la vapeur saturée et ici nous avons de la vapeur surchauffée. Les coefficients ne sont certainement pas les mêmes, mais les lois qui régissent la détente de la vapeur surchauffée sont très peu connues et il est bien difficile d'avoir les chiffres exacts qu'il eût fallu admettre ; nous avons donc été forcé de prendre ceux de la vapeur saturée. Nous croyons du reste qu'ils s'éloignent peu de la valeur exacte, surtout étant donné les grandes admissions employées.

En calculant le travail à produire pour faire remonter une rampe de 50 mm. par mètre à une automotrice avec une remorque, nous avons supposé une vitesse de 5 km. à l'heure ; c'est le chiffre que nous avons admis pour tous les autres cas que nous avons examinés et que nous examinerons dans la suite ; mais nous avons trouvé que la production de vapeur par mètre carré de surface de chauffe, dans ce cas, est de 39,5 kg., c'est-à-dire inférieur à ce que peut produire la chaudière sans même être poussée à son maximum. Il en résulte que la vitesse sur la rampe de 50 mm. pourrait être augmentée et il est intéressant de savoir de combien.

Admettons une production de vapeur dans le générateur de 70 kg. par mètre carré de surface de chauffe, ce qui correspond à une consommation de coke, par mètre carré de surface de grille, d'environ 320 kg., au moyen du souffleur, nous aurons une force en chevaux de :

$$\frac{70 \times 8,35}{9} = 65 \text{ chevaux} = 4\,875 \text{ kgm.}$$

Nous avons trouvé une résistance sur la rampe de 1 960 kg. dans le cylindre ; nous pourrons donc avoir une vitesse de : $1\,960 \times x = 4\,875$; d'où $x = 2,48$ m. ou 9 km. à l'heure.

Ce travail pourra être obtenu dans le cylindre avec une pression de 20 kg. et une admission de 75 0/0 environ.

La force de 65 chev. représente le maximum qui peut être obtenu avec cette machine.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Les dépenses de traction par kilomètre-voiture peuvent s'établir en prenant les mêmes bases que celles qui nous ont servi pour la voiture Rowan ; car les dépenses de graissage et d'eau sont les mêmes dans les deux systèmes.

Quant à l'entretien du matériel roulant, des moteurs et des dépôts, il y aurait peut-être lieu à une majoration, étant donné le système de chaudières ; mais, faute de renseignements exacts, nous supposerons qu'il est le même.

Combustible 2,54 kg. à 0,040 fr. le kg. (*coke*)	0.102
Huile, graissage et eau	0,017
Réparation et entretien du matériel roulant, des moteurs, ateliers, personnel des ateliers et matières .	0,100
Salaire des mécaniciens.	0.080
Dépense de traction par kilomètre-voiture. . .	0,299

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il faut ajouter celles qui sont dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 km. ayant 30 voitures dont 20 en service, parcourant chacune 150 km. par jour, peut s'établir comme il suit :

Outillage des ateliers.	35 000 fr.
Bâtiments des dépôts et ateliers.	150 000 —[1]
Prises d'eau supplémentaires	25 000 —
30 voitures à 30 000 fr.	900 000 —
Total.	1 110 000 fr.

Ce qui représente pour un parcours annuel de 1 000 000 de kilomètres une dépense de :

$$\frac{1\,110\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0,11 \text{ fr.}$$

La dépense totale de traction par kilomètre-voiture s'élèvera donc à : 0,299 fr. + 0,110 fr. = 0,409 fr.

[1] L'achat des terrains n'est pas compris dans ce chiffre.

DEUXIÈME CLASSE

TRAMWAYS

où

L'ÉNERGIE EST EMPRUNTÉE A UNE USINE CENTRALE

ET EMMAGASINÉE DANS LE VÉHICULE

TRAMWAYS A LOCOMOTIVE SANS FOYER. — TRAMWAYS A AIR COMPRIMÉ

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES A ACCUMULATEURS. — TRAMWAYS A GAZ

LOCOMOTIVES SANS FOYER

(SYSTÈME LAMM ET FRANCQ)

Dans ce système, ce ne sont plus d'automotrices se remorquant elles-mêmes et remorquant à l'occasion une seconde voiture, dont nous avons à parler. Il s'agit ici de locomotives traînant une ou plusieurs voitures à voyageurs : ce sont, en un mot, de véritables trains. Ce n'est pas que ce système exclût, en principe, l'automotrice, mais son application nous paraît assez difficile et nous n'en connaissons pas d'exemple.

Ici encore, c'est la vapeur qui engendre la force motrice; mais cette vapeur n'est plus produite par la combustion dans un foyer intérieur à la chaudière, comme dans les locomotives ordinaires; on évite ainsi les inconvénients nombreux inhérents à ce système. C'est sur la grande capacité calorifique de l'eau que la production de la vapeur est basée.

Un réservoir formant la chaudière de la locomotive contient une certaine quantité d'eau dont on a soin de porter la température à un degré assez élevé. Cette masse d'eau contient donc, emmagasinée, une quantité de chaleur qui produira de la vapeur, lorsque la pression de celle-ci et par conséquent sa température ira en s'abaissant, entre la pression initiale au départ et la pression finale. C'est un accumulateur de chaleur. Cette quantité de vapeur produite dépendra du volume d'eau contenu dans la chaudière et de la différence entre les pressions extrêmes. En général, ces pressions extrêmes sont 15 kg. et 3 kg., pour des raisons que nous donne-

rons plus loin; quant à la masse d'eau, elle dépendra du poids du train et du nombre de kilomètres à parcourir sur un profil donné.

Ce type de chaudière sans foyer a été imaginé vers 1873 aux États-Unis par le Docteur Lamm qui l'appliqua sur un tramway de la Nouvelle-Orléans et sur un autre tramway de New-York. A la même époque, M. Léon Francq étudiait à Paris une chaudière semblable et c'est ce dernier type, amélioré et perfectionné dans ces dernières années, qui a reçu des applications assez nombreuses. En France, on le trouve à Paris sur les tramways de l'Étoile à Courbevoie et de l'Étoile à Saint-Germain; sur le tramway de Saint-Germain à Poissy, sur ceux de Lille à Roubaix et de Lille à Tourcoing; sur ceux de Lyon à Bron, de Lyon à Monplaisir, de Perrache aux Brotteaux, sur le tramway de l'Est de Marseille; à l'étranger sur le chemin de fer de Batavia à Kramat (île de Java) notamment.

La chaudière dont nous venons de parler est de forme cylindrique et placée horizontalement sur un bâti en fer reposant sur deux essieux. Cette chaudière en tôle d'acier est enveloppée d'un enduit calorifuge laissant entre lui et la tôle une couche d'air, dans le but d'éviter les pertes de chaleur dues au rayonnement extérieur.

Un dôme de vapeur d'un assez grand volume est placé à la partie supérieure de la chaudière et c'est dans ce dôme que se fait la prise de vapeur. Cette vapeur est ensuite conduite aux cylindres moteurs de la machine, après avoir traversé un réservoir en forme de faisceau de tubes, traversant le corps cylindrique de la chaudière et où la vapeur, avant de se rendre aux cylindres, se sèche et même se surchauffe dans une certaine mesure.

Comme, pendant la marche de la machine, la pression de la vapeur s'abaisse constamment dans la chaudière et qu'il est indispensable de l'admettre dans les cylindres à une pression, sinon toujours la même, pendant toute la durée du trajet, au moins constante pendant une certaine durée de celui-ci, on a dû interposer entre le dôme de vapeur et le réservoir intérieur, un *détendeur*, qui permet de régler, à la volonté du mécanicien, cette pression. Nous décrirons plus loin le détendeur étudié par MM. Francq et Mesnard et appliqué sur le tramway de la place de l'Étoile vers Saint-Germain.

L'appareil moteur est entièrement semblable à celui d'une locomotive; les cylindres sont généralement intérieurs avec accouplement extérieur des essieux. Cependant certaines machines sont construites avec le mécanisme moteur placé à l'extérieur des longerons; cette disposition nous paraît recommandable, car elle simplifie la construction et facilite beaucoup la visite et l'entretien du mécanisme qui se trouve tout à fait à la portée de la main du mécanicien.

Le changement de marche et la distribution de la vapeur dans les cylindres sont obtenus avec les dispositions Stephenson, Walschaërt, Joy ou autres; il n'y a aucune disposition nouvelle.

Les appareils de la machine, nécessaires pour la manœuvre du changement de marche, des freins et autres accessoires sont doubles, afin d'éviter le retournement de la machine aux points terminus.

La vapeur, après avoir produit son effet dans les cylindres, se rend dans un condenseur à air placé à la partie supérieure de la chaudière, en arrière du dôme de vapeur. Ce condenseur est formé de tubes verticaux dans lesquels circule un courant d'air très actif et autour desquels passe la vapeur. Celle-ci se condense à ce contact et la partie non condensée s'échappe dans l'atmosphère par la partie supérieure du condenseur. L'eau condensée est ramenée par un tuyau dans un petit réservoir ménagé sous la plate-forme du mécanicien. Il ne se condense guère que le tiers de la vapeur d'échappement.

Dans les derniers types de locomotives construites, on peut admettre que le poids d'eau contenu correspond à 30 p. 100 du poids total de la machine à vide, ou à 0,231 de la machine en charge.

$$(0{,}30\ \mathrm{P} + \mathrm{P})\, x = 0{,}30\ \mathrm{P};$$

$$x = \frac{0{,}30}{1{,}30} = 0{,}231,$$

P étant le poids de la locomotive à vide.

Lorsque la quantité de chaleur emmagasinée dans l'eau de la chaudière est épuisée et que la pression finale est atteinte, il faut renouveler cette quantité de chaleur en introduisant à nouveau dans la chaudière une quantité de vapeur un peu supérieure à

celle dépensée, nous verrons pourquoi, en ramenant ainsi la pression initiale à 15 kg.

Cette opération se fait dans une usine centrale où est installée une batterie de chaudières timbrée, à une pression supérieure de 1 kg. généralement, à celle employée dans la locomotive, c'est-à-dire à 16 kg. Cette différence de pression est nécessaire pour produire l'écoulement de la vapeur.

Les chaudières doivent avoir une puissance de production de vapeur supérieure, ou au moins égale, à celle à fournir aux différentes locomotives en service.

En raison des hautes pressions à atteindre, on emploie généralement des chaudières multibulaires du système Belleville, Babcock ou autres; mais il n'y a pas de règles et on trouve en service d'autres types aussi avantageux. Ce qu'il faut avant tout, c'est une chaudière étudiée spécialement, produisant économiquement de la vapeur; en général ces chaudières vaporisent 8 kg. d'eau par kilogramme de charbon.

Pour renouveler la vapeur dans la chaudière, les locomotives sont amenées sur des voies de chargement munies de fosses. Un tuyau longitudinal à ces fosses est réuni par un branchement avec les batteries de chaudières et ce même tuyau longitudinal peut être réuni par d'autres branchements mobiles avec un robinet d'alimentation placé à demeure sur la chaudière. La jonction avec ce robinet se fait au moyen d'un raccord fileté.

Ce robinet d'introduction de vapeur dans la chaudière de la locomotive est réuni avec un tube horizontal, placé au milieu de la masse d'eau du réservoir cylindrique; ce tube est percé de trous et la vapeur, en s'échappant par ces orifices, traverse toute la masse d'eau et l'échauffe rapidement; vingt minutes suffisent généralement pour charger une chaudière de locomotive; parfois il faut moins de temps, selon la puissance de vaporisation des chaudières et le nombre de chargements à faire en une heure. Entre la prise de vapeur des chaudières fixes et le robinet d'alimentation placé sur la locomotive, on intercale un robinet pour régler l'écoulement de la vapeur. Nous donnons plus loin le dispositif employé au tramway de Poissy à Saint-Germain.

Étant donné ces dispositions générales, trois questions se posent:

1° Quelle est la quantité de vapeur que produira la masse d'eau contenue dans la chaudière, lorsqu'elle s'abaissera de la température t_1 à la température t_0 ou de la pression initiale à la pression finale ; quelles seront les pressions limites les plus avantageuses à adopter ?

2° Quel travail cette quantité de vapeur produira-t-elle dans les cylindres, et par suite, quelle quantité d'eau faudra-t-il mettre dans la chaudière pour produire un travail donné ?

3° Enfin, quel sera le poids de locomotive qu'il faudra admettre pour remonter une rampe donnée ou parcourir un trajet donné ?

Nous allons examiner successivement ces questions.

QUANTITÉ DE VAPEUR PRODUITE PAR KILOGRAMME D'EAU CONTENU DANS LA CHAUDIÈRE

La quantité de vapeur que peut produire dans une chaudière un poids d'eau P, dont la température et la pression vont en s'abaissant, s'obtiendra en écrivant que la perte de chaleur de la masse P, dont la température s'abaisse d'une faible quantité dt, est égale à la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser une quantité dP de la masse d'eau.

En appelant r la chaleur de vaporisation qui est :

$$r = 606,5 - 0,695\ t ;$$

on a :

$$\mathrm{P}dt = rd\mathrm{P} \text{ ou } ; \frac{dt}{r} = \frac{d\mathrm{P}}{\mathrm{P}} ;$$

d'où :

$$d\mathrm{P} = \frac{\mathrm{P}dt}{606,5 - 0,695\ t.} ;$$

en intégrant entre la température initiale t_1 et la température finale t_0 on obtient :

$$\frac{\mathrm{P}_1}{\mathrm{P}_0} = \left(\frac{871 - t_0}{871 - t_1}\right)^{1,44} .$$

P_1 = poids d'eau primitif;

P_0 = — restant ;

d'où on peut tirer :

$$\frac{P_1 - P_0}{P_1} = 1 - \left(\frac{871 - t_1}{871 - t_0}\right)^{1,44}.$$

Cette formule nous donnera le poids de vapeur produite par 1 kg. d'eau, dont la température s'abaisse de t_1 à t_0 ou de la pression p_1 à la pression p_0 correspondant à ces températures.

On pourra donc calculer le tableau suivant :

Pression de la vapeur dans la chaudière.	Température dans la chaudière.	Poids de vapeur produite par 1 kg. d'eau. $\frac{P_1 - P_0}{P_1}$
15 at.	198°,8	«
14	195°,5	0,0068 kg.
13	192°,1	0,0142
12	188°,4	0,0227
11	184°,5	0,0299
10	180°,3	0,0384
9	175°,8	0,0470
8	170°,8	0,0570
7	165°,3	0,0676
6	159°,2	0,0792
5	152°,2	0,0919
4	144°,0	0,1066
3	134°,0	0,1242
2	120°,2	0,1480

On remarquera de suite que la production de vapeur par kilogramme d'eau va en diminuant avec l'augmentation de pression : ainsi 1 kg. d'eau, en s'abaissant de 14 kg. à 13 kg., ne produira que 0,0074 kg., tandis que le même abaissement entre 3 et 4 kg. est de 0,0176 kg., c'est-à-dire plus du double. Les hautes pressions ne présentent donc pas d'avantage, et c'est pour cela que la pression initiale dans les chaudières a été limitée à 15 kg.

Il y aurait donc tout intérêt à abaisser le plus possible la pression finale ; mais il ne faut pas oublier que c'est cette pression finale qui servira à produire l'effort moteur dans les cylindres de la locomotive. Or, on sait que le rendement économique diminue lorsque la pression d'admission dans les cylindres devient plus faible ; de plus les dimensions de ceux-ci deviennent considérables et, par suite, le poids du moteur augmente. Il y a donc de ce fait une limite pratique qui a fait admettre, comme pression minimum

d'admission dans les cylindres, le chiffre de 3 kg., en exigeant toutefois du mécanicien qu'il ne rentre jamais au dépôt avec une pression dans la chaudière inférieure à 4 kg. ou 3,5 kg.

Cette pression de 3 kg. est la pression minimum ; mais elle serait insuffisante dans certains cas, notamment lorsqu'il s'agit d'aborder de fortes rampes d'une certaine longueur ; dans ce cas, des pressions d'admission de 6 et même de 7 kg. sont souvent nécessaires. Ces rampes ne peuvent donc être abordées que lorsque la chaudière est encore loin de sa pression finale ; cette considération importante conduit à conclure qu'il y a toujours intérêt à mettre les usines centrales de charge aux points bas de la ligne et à faible distance des parties de voie à fortes rampes, à moins d'avoir, comme pour les tramways à air comprimé, une petite chaudière de réserve qui viendrait en aide dans les cas exceptionnels.

En résumé, on peut admettre qu'une chaudière sans foyer dont les pressions limites sont 15 kg. et 3 kg., peut fournir, par kilogramme d'eau contenu dans la chaudière, un poids de vapeur de 0,125 kg.

Evidemment la quantité de vapeur à fournir par l'usine centrale devra, après l'épuisement dans la chaudière de la locomotive, être la même quantité : $\frac{P_1 - P_0}{P'}$ par kilogramme d'eau contenu dans cette chaudière ; mais il faut compter sur les pertes dues au rayonnement, quoique celles-ci soient faibles, et, surtout, sur les purges qu'il faut faire régulièrement dans la chaudière. On peut compter que ces différentes pertes peuvent monter à 10 p. 100 du poids de vapeur à fournir.

La quantité de vapeur pour le réchauffage, à fournir par l'usine centrale, sera donc, par kilogramme d'eau contenu dans la chaudière de la locomotive, de :

$$\frac{P_1 - P_0}{P_1} \times 1{,}10 \text{ ou : } 0{,}125 \text{ kg.} \times 1{,}10 = 0{,}137 \text{ kg.}$$

TRAVAIL DANS LE CYLINDRE PAR KILOGRAMME DE VAPEUR DÉPENSÉ

Nous avons dit que la vapeur arrivait dans les cylindres un peu surchauffée ; mais dans le but de simplifier les calculs, nous admettrons que cette vapeur est complètement saturée et se détend suivant une courbe isothermique.

Nous admettrons (fig. 26) que l'admission dans le cylindre est de 30 p. 100, ce qui est le cas le plus général, et que les rapports

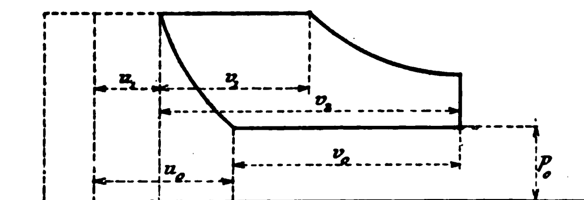


Fig. 26.

relatifs aux espaces neutres, à l'échappement et à la compression sont les suivants :

$$\left.\begin{array}{l} v_1 = 30 \text{ p. } 100\,; \\ v_2 = 75 \text{ p. } 100\,; \\ v_0 = 57 \text{ p. } 100\,; \end{array}\right\} \begin{array}{l} u_1 = 7 \text{ p. } 100\,; \\ u_0 = 25 \text{ p. } 100\,; \end{array}$$

Le travail indiqué dans le cylindre sera :

$$T = p_1 v_1 + p_1 (v_1 + u_1) \log \frac{v_2 + u_1}{v_1 + u_1} - p_0 v_0 - p_0 u_0 \log \frac{u_0}{u_1}.$$

Pendant ce travail, on dépensera un poids de vapeur de :

$$Q = d_1 (v_1 + u_1) - d_0 v_0.$$

d_1 étant le poids de la vapeur à la pression p_1

d_0 le même poids de la vapeur à la pression p_0

Le travail produit par un kilogramme de vapeur sera donc :

$$\frac{T}{Q}$$

Le résultat que nous obtiendrons ainsi sera le travail théorique ;

mais il faut tenir compte des condensations de vapeur dans le cylindre, du laminage de celle-ci et des autres pertes accessoires. En admettant que le travail pratique est égal à 70 p. 100 du travail théorique, nous serons dans les limites des résultats obtenus par l'expérience.

Nous obtiendrons donc les résultats suivants :

PRESSION D'ADMISSION	TRAVAIL THÉORIQUE	TRAVAIL THÉORIQUE par KILOG. DE VAPEUR	TRAVAIL PRATIQUE PAR KILOG. DE VAPEUR Rendement = 0,70.
Kg.	Kgmm.	Kgmm.	Kgmm.
3	7 200	16 500	11 550
4	13 120	21 000	14 700
5	19 000	23 500	16 450
6	25 000	25 100	17 570

Le travail théorique passe donc de 7 200 à 25 000 kgm., lorsque la pression d'admission passe de 3 kg. à 6 kg. ; il devient trois fois et demie plus grand. On voit donc l'importance des pressions élevées lorsqu'il s'agit de points particuliers, comme les fortes rampes.

Néanmoins, on voit qu'à la pression d'admission de 3 kg., le travail pratique d'un kilogramme de vapeur, avec admission de 30 p. 100, peut être compté comme égal à 12 000 kgm., ce qui correspond à une consommation de vapeur par cheval-heure de : $\frac{270\,000}{12\,000} = 22,5$ kg., consommation considérable qui montre bien le désavantage d'avoir une aussi faible pression d'admission dans les cylindres.

Les chaudières de l'usine centrale devant, comme nous l'avons dit plus haut, fournir 10 p. 100 en plus de vapeur, celles-ci devront donc produire par cheval-heure indiqué dans les cylindres : $\frac{22,50}{0,90} = 25$ kg. de vapeur, ce qui correspond, étant donnée une vaporisation dans les chaudières fixes de 8 kg. d'eau par kilogramme de charbon, à une consommation de charbon par cheval-heure dans les cylindres de : $\frac{25,00}{8} = 3,12$ kg.

Nous avons dit précédemment que 1 kg. d'eau dans le générateur de la locomotive pouvait produire, par l'abaissement de

pression de 15 kg. à 3 kg., une quantité de vapeur égale à 0,125 kg.; il en résulte que ce même kilogramme d'eau produira dans le cylindre un travail de :

$$12\,000 \times 0{,}125 = 1\,500 \text{ kgm.}$$

Dans le cas où, comme cela se fait sur certaines lignes, on aurait une pression d'admission moyenne de 5 kg, la consommation de vapeur par cheval-heure indiqué serait de :

$$\frac{270\,000}{16\,500} = 16{,}4 \text{ kg.}$$

La chaudière de l'usine centrale devrait produire, par cheval-heure indiqué :

$$\frac{16{,}4}{0{,}9} \; 18{,}2 \text{ kg.}$$

de vapeur, correspondant à une consommation de charbon de :

$$\frac{18.2}{8} = 2{,}28 \text{ kg.}$$

Un kilogramme d'eau produirait dans le cylindre un travail de :

$$16\,500 \times 0{,}092 = 1\,518 \text{ kgm.}$$

Ces différents chiffres sont importants et font la base du calcul des locomotives sans foyer, comme nous le verrons plus loin.

La vapeur étant admise dans les cylindres à une pression qui, en général, sauf les cas exceptionnels, varie entre 4 et 3 kg., et la vapeur dans le générateur étant toujours à une pression supérieure à celle-ci, on pourrait croire qu'il y a une perte considérable de rendement due à cette perte de pression sans travail extérieur. Mais il ne faut pas oublier que, dans ce travail de détente, il y a surchauffe de la vapeur et qu'il en arrivera par ce fait aux cylindres une plus grande quantité. Cet effet, joint à celui de la surchauffe dans le tube intérieur de la chaudière entre le détendeur et les cylindres, viendra en compensation de cette perte.

POIDS DE LOCOMOTIVE NÉCESSAIRE POUR REMONTER UNE RAMPE ET PARCOURIR UNE DISTANCE DONNÉE

Une locomotive destinée à remorquer un certain nombre de voitures doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° Son poids adhérent doit être suffisant pour équilibrer toutes les résistances extérieures ;

2° Elle doit pouvoir produire la quantité de vapeur nécessaire pour se mouvoir elle-même, tout en remorquant son train sur une longueur donnée.

Nous allons écrire ces deux équations ; mais auparavant il est bon d'être fixé sur la quantité de travail que peut produire une tonne de locomotive en charge ; or, cela nous est facile. Nous avons dit, en effet, plus haut que une tonne de locomotive en charge contenait 231 kg. d'eau et que un kilogramme d'eau produisait dans les cylindres un travail de 1 500 kgm., en admettant une pression d'admission de 3 kg. Une tonne de locomotive en charge pourra donc produire dans les cylindres un travail de :

$$231 \times 1\,500 = 346\,500 \text{ kgm.; soit } 350\,000 \text{ kgm.}$$

en chiffres ronds.

Ceci établi, écrivons nos deux équations ; nous aurons pour la première :

$$130\ P = (r + p)\ P + (r' + p)\ p' ;$$

et pour la seconde :

$$350\,000\ P = r'' \times 1\,000 \times P \times L + r''' \times 1\,000 \times p' \times L.$$

P = poids de la locomotive en tonnes ;

p' = poids remorqué en tonnes ;

r = résistance en palier de la locomotive ;

r' = — — des voitures ;

p = résistance de la rampe ;

r'' = — de la locomotive (palier, alignement droit, résistances supplémentaires) ;

r''' = résistance des voitures dans les mêmes conditions ;

L = longueur du parcours.

Admettons : $P = 1$ et $R = \frac{P}{p'} = \frac{1}{p'}$.

Le coefficient d'adhérence est pris égal à 0,13, soit 130 kg. par tonne.

Nous tirerons de la première équation :

$$p = \frac{R\ (130 - r) - r'}{R + 1};$$

qui nous donnera la rampe que pourra remorquer une locomotive dont le poids, relativement à la charge remorquée, est fixé,

$$R = \frac{p + r'}{130 - r - p};$$

formule qui nous donnera le poids, relativement à la charge remorquée, que devra avoir une locomotive pour remonter une rampe fixée.

De la seconde équation nous tirons :

$$L = \frac{350\ R}{Rr'' + r'''};$$

qui nous donnera la longueur que pourra parcourir une locomotive dont le poids, relativement à la charge remorquée, est donné :

$$R = \frac{r'''\ L}{350 - Lr''};$$

qui nous donnera le poids, relativement à la charge remorquée, que devra avoir une locomotive pour parcourir une distance donnée.

L'examen de ces formules montre de suite que le poids de la locomotive augmente d'une manière importante, à mesure que la rampe augmente ou que la longueur à parcourir devient plus considérable, ce qui était presque évident *à priori*. Mais, examinons le travail qu'il faudra faire, par kilomètre, pour différentes valeurs de R, c'est-à-dire du poids de la locomotive relativement au poids remorqué, en prenant ce dernier pour unité; nous pouvons écrire l'équation :

$$\frac{1}{\frac{1}{R}} + 1 = T = \text{le poids total à traîner} = R + 1 = T :$$

A mesure que R augmentera, c'est-à-dire à mesure que la

rampe sera plus forte ou que la longueur à parcourir s'accroîtra, le poids total à remorquer deviendra aussi plus grand, et par conséquent, le travail à produire par kilomètre deviendra plus important.

Ainsi, en supposant qu'on ait à remorquer sur une rampe de 20 mm. une charge de 20 t., le rapport du poids de la locomotive au poids remorqué sera :

$$R = \frac{p + r'}{130 - r - p} = \frac{20 + 8,5}{130 - 13,5 - 20} = 0,29$$

et la charge totale remorquée sera :

$$(R + 1)\,p' = P + p' = (0,29 + 1)\,20 = 25,80 \text{ t.};$$

donnant un effort de traction par kilomètre de :

$$\big((13,5 + 20)\,5,80 + (8,5 + 20)\,20\big) \times 1\,000 = 764\,300 \text{ kg.};$$

c'est-à-dire 34 p. 100 supérieur à celui nécessaire pour remorquer les voitures.

Si au lieu d'une rampe de 20 mm., nous voulons remorquer la même charge sur une rampe de 50 mm., nous aurons :

$$R = \frac{50 + 8,5}{130 - 13,5 - 50} = 0,88\,;$$

et la charge totale remorquée sera :

$$(0,88 + 1)\,20 = 37,60$$

donnant un effort de traction par kilomètre de :

$$\big((13,5 + 50)\,17,50 + (8,5 + 50)\,20\big) \times 1\,000 = 2\,287\,600 \text{ kgm.}$$

soit 95 p. 100 plus grand que celui nécessaire pour la traction des voitures seules.

On voit donc l'énorme influence des rampes sur l'effort total à produire et le grand avantage qu'il y a à employer des locomotives d'un poids aussi faible que possible, quitte à augmenter le nombre des usines centrales et à renouveler plus souvent l'eau dans la chaudière de la locomotive.

Cette influence serait moins grave avec des automotrices[1], parce qu'alors le poids des voyageurs viendrait aider à l'adhérence et permettrait, en renouvelant plus fréquemment l'eau, d'avoir des chaudières d'un poids plus faible. Mais serait-il facile d'installer sur des automotrices les bouilleurs nécessaires pour la production de la vapeur ? C'est une question que l'expérience seule pourrait résoudre, et, comme nous l'avons dit, il n'y en a pas encore d'exemple.

Ces principes généraux établis, nous allons décrire l'application de ce système au tramway de la *Place de l'Étoile à Courbevoie et à Saint-Germain.*

Cette ligne d'une longueur totale de 18 700 m., non compris les deux embranchements de Rueil à Rueil-Gare et de Port-Marly à Marly, commence à la place de l'Étoile et finit sur la place du Château à Saint-Germain. Le rayon minimum adopté pour les courbes est de 62 m.; quant aux rampes maxima, elles sont de 34 mm. sur l'avenue de la Défense, de 34 mm. entre Courbevoie et Nanterre et de 62 mm. entre le Pecq et Saint-Germain.

La voie, sauf entre l'Étoile et la porte Maillot, où le rail Broca est employé, est une voie Vignole à rail saillant posée sur traverses et sur l'accotement de la route. La largeur de la voie est de 1.45 m.

Le nombre des arrêts fixés est de 37 entre l'Étoile et Saint-Germain et la vitesse commerciale est de 14 km. à l'heure. Le nombre des trains par jour est de 40 (20 dans chaque sens); ces trains sont composés de trois voitures, au maximum.

Locomotives. — La figure 27 donne la coupe longitudinale et la vue de bout des locomotives faisant le service. Nous les avons décrites précédemment; nous n'avons rien à ajouter à cette description. Nous parlerons toutefois du détendeur de vapeur, représenté sur la figure 28. Ce détendeur a été réuni au régulateur d'admission, quoique l'indépendance d'action de ces deux organes soit maintenue. Voici sa description : il se compose de deux soupapes

[1] Quand on compare le poids de la locomotive au poids utilement traîné, on constate que le poids du moteur-locomotive n'est pas plus élevé que le poids du moteur de la voiture automotrice.

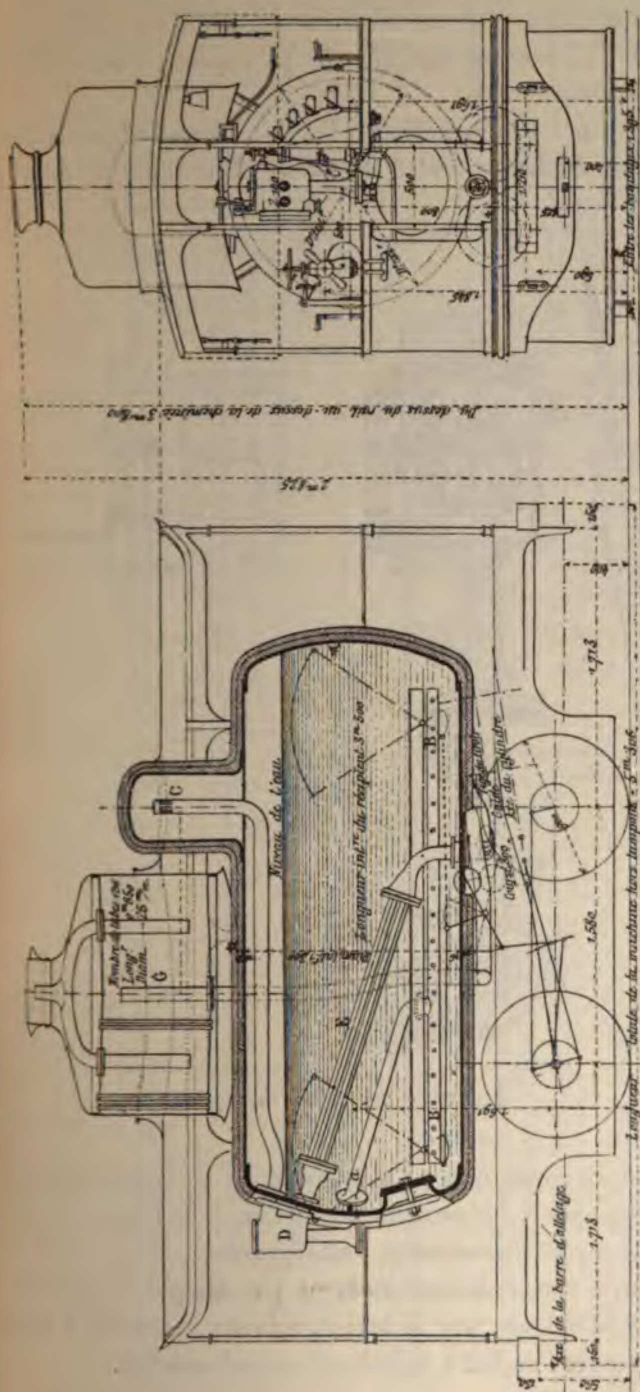


Fig. 27. — Locomotive du tramway de l'Étoile à Saint-Germain.

A liées entre elles et de même diamètre, afin d'en permettre l'équi libre sous la pression variable de la vapeur, introduite par tiroir B du régulateur.

Ces soupapes sont soumises à l'action d'une balance C, par l'i termédiaire du levier cintré D et d'un obturateur E, garni d'un

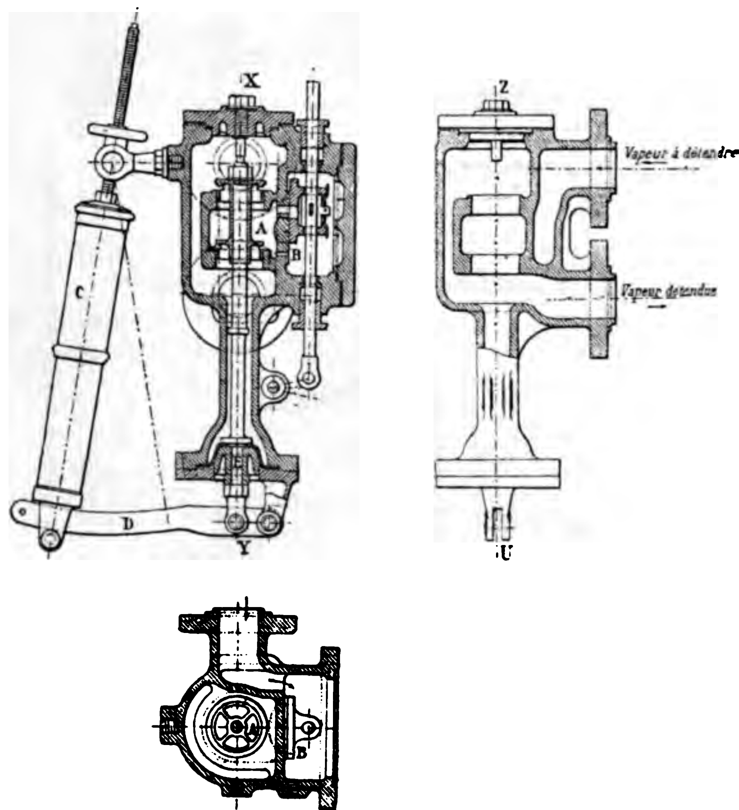


Fig. 28. — Détendeur de vapeur.

membrane en caoutchouc. La pression de la vapeur qui s'éco par les soupapes A, dépendant de l'action de la balance sur l'ob rateur qui reçoit directement cette pression, il en résulte qu peut la faire varier instantanément par simple déplacement l'action de la balance sur le levier, suivant le travail à produ Cette manœuvre se fait à la volonté du mécanicien.

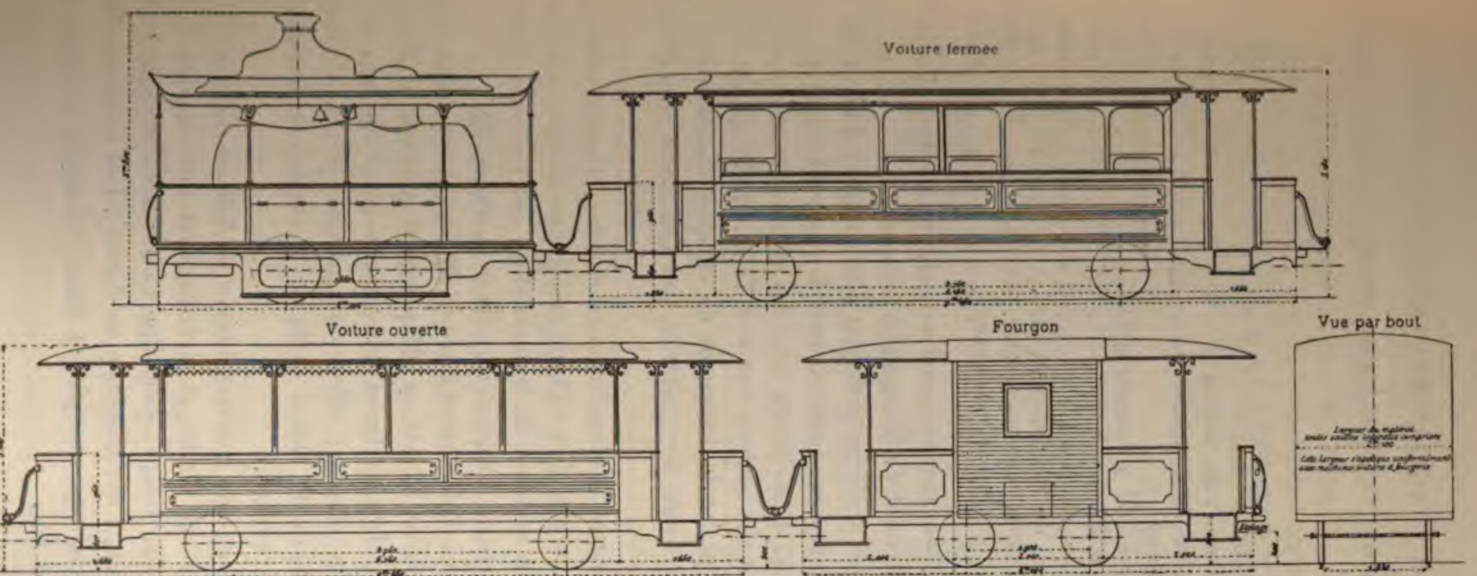


Fig. 29. — Voiture et locomotive du tramway de l'Étoile à Saint-Germain.

Les dimensions principales de la locomotive sont les suivantes :

Diamètre des cylindres	0,330 m.
Course des pistons	0,300 —
Diamètre des roues	0,900 —
Écartement des essieux	1,580 —
Diamètre de la chaudière	1,300 —
Longueur — —	3,500 —
Volume total y compris le dôme	4 480 litres
Volume d'eau	3 600 —
Pression maxima	15 kg.
Surface du condenseur à air	60 m²
Poids de la machine à vide	12 t.
— — en charge	15,6 t.

Voitures. — Les voitures se composent de voitures d'été, de voitures d'hiver et de fourgons à bagages.

Les voitures d'été ne diffèrent des voitures d'hiver que par les bancs qui sont transversaux dans les premières et parce qu'elles sont ouvertes. Les châssis sont les mêmes pour les deux types. L'écartement des essieux est de 4,75 m.; la longueur de la caisse est de 6,15 m. et la longueur de chaque plate-forme de 1,65 m. La longueur totale des voitures, qui sont sans impériales, est de 9,45 m.

Pour permettre la circulation en courbe, chaque essieu supporte la caisse au moyen d'un châssis métallique mobile, relié à son conjugué par un système de triangulation qui les rend convergents.

Ces voitures sont représentées sur la figure 29.

Les voitures d'été pèsent à vide 4200 kg. et en charge 7700 kg.; elles contiennent 52 places (24 places d'intérieur et 28 places de plate-forme). Les voitures d'hiver pèsent 4 500 kg. à vide et 8 000 kg. en charge; elles sont mixtes (1re et 2e classe) avec 52 places (26 de 1re classe et 26 de 2e classe) ou entièrement de 2e classe à 54 places.

Le chauffage des voitures d'hiver se fait au moyen du thermosiphon du système Gallet, et l'éclairage est obtenu, pour chaque voiture, par quatre lampes électriques à incandescence de 16 bougies (2 à l'intérieur, 1 sur chaque plate-forme). Les accumulateurs destinés à cet éclairage sont placés dans le fourgon à bagages, dans des coffres *ad hoc*.

Le fourgon pèse 2400 kg. à vide et peut contenir 4600 kg. de bagages ; son poids en charge est donc de 7000 kg.

Usines Centrales. — Il existe deux usines centrales servant en même temps de dépôt : l'une à Courbevoie, l'autre à Port-Marly. Elles sont toutes les deux placées aux points bas de la ligne, pour les raisons développées plus haut.

Le dépôt de Courbevoie (fig. 30) comporte une série de voies pour le remisage, sous des hangars couverts, du matériel. Un

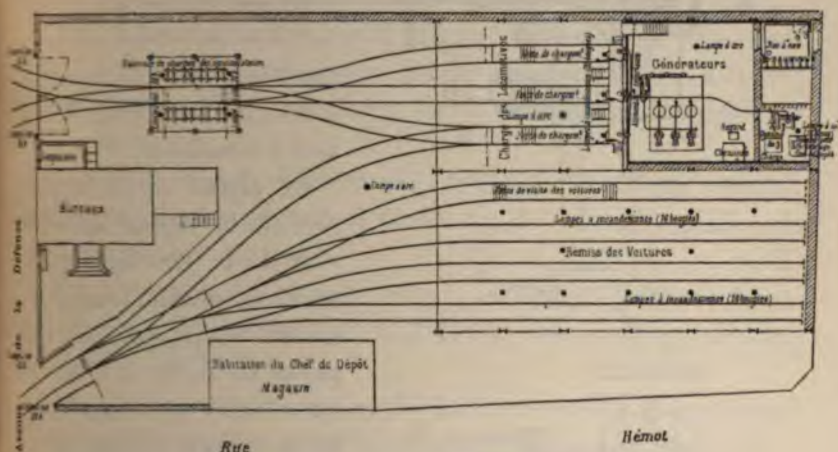


Fig. 30. — Usine centrale de Courbevoie.

hangar voisin contient les chaudières fixes et les machines pour l'éclairage. Un abri avec deux estacades de chargement pour les accumulateurs est disposé près de l'entrée.

Les générateurs, pour le réchauffage de l'eau des chaudières des locomotives, sont du type multitubulaire ; au nombre de trois, ils ont chacun une surface de chauffe de 60 m² et sont timbrés à 16 kg.

Le réchauffage de l'eau dans les chaudières se fait de la manière suivante. La machine est amenée sur une fosse de chargement en face de la prise de vapeur. Comme nous l'avons dit précédemment, le tuyau de prise de vapeur des chaudières est relié avec le tuyau de chargement de la chaudière de la locomotive par un robinet spécial, muni d'un robinet

réglant d'une manière automatique l'écoulement de la vapeur, de sorte que le réchauffement de l'eau à l'intérieur du réservoir se fait progressivement et sans entraînement d'eau, jusqu'à ce que la pression ait atteint 15 kg.

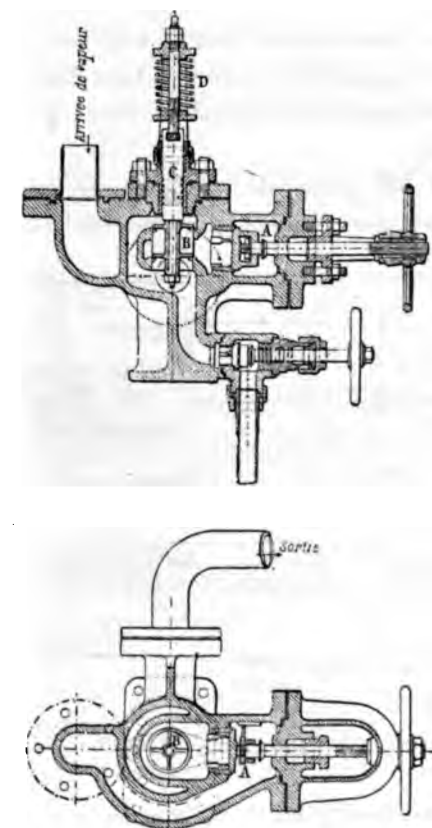


Fig. 31. — Robinet d'écoulement de vapeur.

La figure 31 représente ce robinet d'écoulement. La vapeur venant des générateurs est admise par le robinet A entre deux soupapes équilibrées B, reliées au piston C, sur lequel agit le ressort à boudin D.

Ce piston reçoit la pression de la vapeur du réservoir de la machine qui le soulève graduellement en même temps que les soupapes B, au fur et à mesure que cette pression augmente ; il en résulte que la section d'écoulement aux soupapes allant en augmentant avec la pression dans le réservoir, cette section devient égale à celle des tuyaux, à la fin de l'opération, quand la pression s'équilibre entre le réservoir de la locomotive et le générateur.

L'usine de Port-Marly contient trois générateurs, mais ceux-ci sont du type locomotive, avec grand réservoir de vapeur. La méthode de chargement est la même qu'à Courbevoie.

TRAVAIL MOYEN PAR KILOMÈTRE-TRAIN

La voie, sur la plus grande partie de sa longueur, étant formée de rails saillants du type Vignole, posés sur traverses, nous pren-

drons, comme résistance en palier et en alignement droit, les chiffres suivants :

Locomotive 9 kg. ; voitures 5 kg.

Nous admettrons également que le train est formé de trois voitures pesant chacune 8 t. en charge, soit en tout 24 t. Le poids de la locomotive en charge est de 16 t.

Avant de calculer le travail, il faut connaître la résistance moyenne totale par tonne, y compris tous les efforts supplémentaires ; en appliquant la méthode que nous avons indiqué au chapitre « Résistance à la traction », nous avons trouvé que :

1° Sur la section entière, entre la place de l'Étoile et Saint-Germain, cette résistance moyenne totale était de 13 kg.: soit une augmentation de 13 — 7 = 6 kg. sur la résistance en alignement droit et en palier ;

2° Sur la section de Courbevoie (dépôt) à Port-Marly (dépôt), cette même résistance était de 12 kg., soit une augmentation de 12 — 7 = 5 kg ;

3° Sur la section à très forte rampe, entre Port-Marly et Saint-Germain, ce même chiffre était de 20,5 kg., soit une augmentation de 20,5 — 7 = 13,5 kg.

Cette résistance moyenne s'applique, bien entendu, au parcours d'un train *aller et retour*, entre les deux points considérés.

Le travail moyen par kilomètre-train pour la section entière, entre la place de l'Étoile et Saint-Germain, sera :

$$(24 + 16)\ 13 \times 1\,000 = 520\,000 \text{ kgm.}$$

Ce travail étant celui à la jante des roues de la locomotive, il faut tenir compte du coefficient de rendement du moteur ; nous pouvons admettre que ce rendement est de 0,85.

Le travail dans les cylindres sera donc : $\frac{520\,000}{0,85} = 612\,000$; soit en chevaux-heure : $\frac{612\,000}{270\,000} = 2,26$ chev.

Nous avons dit plus haut que pour produire un cheval-heure dans les cylindres, il fallait une consommation de charbon de 3,12 kg. (en supposant une pression d'admission de 3 kg). La consommation de charbon par kilomètre-train de trois voitures sera donc de :

$$2,26 \times 3,12 = 7,05 \text{ kg.} ;$$

ou, par tonne de train (machine comprise) :

$$\frac{7,05}{40} = 0,176 \text{ kg.};$$

et par tonne remorquée :

$$\frac{7,05}{24} = 0,291 \text{ kg.}$$

Ce chiffre est évidemment un maximum, car tous les trains ne sont pas composés de trois voitures.

Cherchons quel sera le travail moyen en chevaux à produire par seconde, pour parcourir la distance entière entre la place de l'Étoile et Saint-Germain, à la vitesse de 14 km. à l'heure et quelle sera la pression maximum qu'il faudra admettre dans les cylindres, pour obtenir ce travail :

Le travail en chevaux dans les cylindres sera :

$$2,26 \times 14 = 31,64 \text{ chev.};$$

et l'effort à produire dans les cylindres sera :

$$\frac{31,64 \times 75}{\frac{14}{3600}} = 612 \text{ kg.}$$

Quant à la pression d'admission, on la trouvera facilement en se servant de la formule :

$$p = \frac{T.\,D}{\alpha.\,d^2.\,l}$$

dans laquelle :

T	représente	l'effort à produire égal, dans le cas considéré, à. .	612 kg.
D	—	le diamètre des roues motrices	0,90 m.
d	—	le diamètre du cylindre	0,33 —
l		la course du piston	0,30 —
α		coefficient de réduction dépendant de l'admission et de la distribution. L'admission étant généralement en marche normale de 30 p. 100, nous pouvons prendre pour α la valeur.	0,55 —

Nous aurons donc :

$$p = \frac{612 \times 90}{[illegible]} = 3,06 \text{ kg.}$$

Avec une pression d'admission dans les cylindres de 3 kg. environ, on pourra donc obtenir l'effort moyen nécessaire pour parcourir la distance entière entre la place de l'Étoile et Saint-Germain. Mais, comme nous l'avons dit, le profil est variable entre ces deux points et, avant l'arrivée à Saint-Germain, il y a à gravir une longue rampe dont le maximum atteint à un certain endroit 62 mm, et dont la moyenne générale est de 50 mm. Il est intéressant de connaître quel est, dans ce cas, le travail qu'il faut produire pour remorquer un train composé de trois voitures et quelle doit être la pression d'admission dans les cylindres.

TRAVAIL MAXIMUM A PRODUIRE POUR REMONTER LA RAMPE DE SAINT-GERMAIN[1]

La rampe moyenne étant de 50 mm., la résistance sera :

$$16\ (9 + 50) + 24\ (5 + 50) = 2\,264 \text{ kg.}$$

Dans ce cas, si l'admission dans les cylindres était réduite à 30 p. 100, elle serait insuffisante ; admettons une admission de 65 p. 100, à laquelle correspond un coefficient de réduction α de 0,80; nous aurons :

$$p = \frac{2\,264 \times 90}{0{,}80 \times \overline{33}^2 \times 30} = 7{,}79 \text{ kg.} ;$$

c'est donc une pression d'admission de 8 kg. environ qui est nécessaire pour remonter la rampe de Saint-Germain, avec trois voitures.

Cette condition est facile à remplir, parce que la rampe en question est abordée très peu de temps après le départ du train de l'usine centrale de Port-Marly, où l'eau de la chaudière a été complètement réchauffée et que, par conséquent, l'abaissement de pression y est faible. A la fin d'un trajet, cette rampe ne pourrait pas être remontée par un train de 3 voitures pesant, comme dans le cas actuel, 24 t. (machine non comprise).

Cet effort serait encore augmenté si, par suite d'un arrêt intem-

[1] Nous admettons ici, et dans le calcul qui suit, que la résistance du mécanisme de la locomotive est comprise dans le coefficient de résistance moyenne.

pestif sur la rampe, on était obligé d'avoir recours à un démarrage. Supposons que la rampe soit remontée à la vitesse moyenne de 1,67 m. à la seconde (soit 6 kilomètres à l'heure) et que le démarrage doive être obtenu en cinq secondes. En nous reportant aux formules établies précédemment, nous aurons, pour le travail total à produire par tonne :

Travail dû au démarrage. . $51 \frac{\overline{1,67}^2}{\overline{5}^2} (\overline{5}^2 - \overline{4}^2) = 51,49$ kgm.

Travail dû à la résistance. . $\frac{1,67}{5} \left(\frac{5+4}{2}\right) (7+50) = 85,50$ —

Soit un travail total de. . . . . 136,99 kgm.

qui, à la vitesse de 1,50 m., dans la dernière seconde du démarrage, donnera un effort par tonne de :

$$\frac{136,99}{1,5} = 91,32 \text{ kg.};$$

et pour le train entier un effort de :

$$91,32 \times 40 = 3\,652,8 \text{ kg.}$$

En supposant, dans ce cas extrême, l'admission maximum possible dans les cylindres de 75 p. 100 et un coefficient α lui correspondant de 0,89, on trouvera pour la pression nécessaire d'admission :

$$p = \frac{3\,652,8}{363 \times 0,89} = 11,3 \text{ kg.}$$

LONGUEUR DU PARCOURS QU'ON PEUT OBTENIR AVEC LA LOCOMOTIVE DANS LES DIFFÉRENTES SECTIONS DE LA LIGNE

Comme nous l'avons dit, la ligne entière de l'Etoile à Saint-Germain est divisée en trois sections par deux usines centrales. La première comprend la section de l'Etoile à Courbevoie (dépôt), où le train doit faire le parcours, aller et retour, sans réchauffage. La seconde, de Courbevoie (dépôt) à Port-Marly (dépôt), où les chaudières peuvent être chargées à chaque extrémité. La troisième, de Port-Marly (dépôt) à Saint-Germain où, comme dans la première section, le train doit faire le parcours, aller et retour, sans réchauffage.

Voyons si la chaudière sera suffisante pour les deux derniers parcours, qui sont d'ailleurs les plus difficiles.

Nous avons dit qu'entre Courbevoie (dépôt) et Port-Marly (dépôt) la résistance moyenne était de 12 kg. par tonne. Le travail à produire par kilomètre et pour le train de 3 voitures, pesant en tout 40 t., sera :

$$12 \times 40 \times 1\,000 = 480\,000 \text{ kgm}$$ [1].

La chaudière contient 3 600 l. d'eau ; d'après ce que nous avons dit, elle contient donc emmagasiné un nombre de kilogrammètres de :

$$3\,600 \times 1\,500 = 5\,400\,000 \text{ kgm.}$$

La locomotive pourra donc parcourir, sans rechargement, une distance de $\frac{5\,400\,000}{480\,000} = 11{,}6$ km., c'est-à-dire exactement la distance comprise entre les deux dépôts qui est de 11 km.

En faisant le même calcul pour la section la plus difficile, entre Port-Maly (dépôt) et Saint-Germain et retour, nous verrons que l'effort par kilomètre est de :

$$20{,}5 \times 40 \times 1\,000 = 82\,000 \text{ kgm.}$$

et que la distance que pourra parcourir la locomotive en produisant cet effort moyen sera de :

$$\frac{5\,400\,000}{82\,000} = 6{,}6 \text{ km.};$$

c'est-à-dire exactement la distance, aller et retour, entre Port-Marly et Saint-Germain.

Avant de terminer, il nous paraît intéressant de dire quelques mots de la ligne de tramway ouverte au mois d'août 1896 entre *Saint-Germain et Poissy* et qui est le prolongement tout indiqué du tramway de la place de l'Étoile à Saint-Germain que nous venons de décrire. Actuellement le raccordement entre les deux lignes n'existe pas, quoiqu'elles ne soient séparées que par une distance de quelques mètres seulement.

Le tramway de Saint-Germain à Poissy a une longueur de 5 400 m. ; il est à une voie, placée en accotement sur la route. La

[1] Voir la note de la page 83.

pente maximum est de 52 mm. par mètre sur une longueur de 500 m. environ, avant l'entrée dans Poissy ; sur le reste du parcours, la pente moyenne ne dépasse pas 8 mm. par mètre.

Les courbes sont d'un rayon qui varie entre 500 m. et 25 m.; elles n'existent que sur environ 1/6 de la longueur du parcours, à la sortie de Saint-Germain et dans la traversée de Poissy.

La voie est en rails Vignole saillants posés sur traverses, sauf dans la traversée de Poissy, sur une longueur de 1 000 m. environ, où elle est à ornière,

Il a été prévu quatre arrêts ; mais des arrêts facultatifs, au nombre de sept, ont été également réservés, ce qui porte à onze le nombre des arrêts possibles entre Saint-Germain et Poissy.

Le service est organisé au moyen de quatorze trains par jour dans chaque sens, entre 6 h. 30 du matin et 11 h. 40 du soir ; la durée du trajet est de 25 minutes, ce qui donne une vitesse commerciale de 13 km. à l'heure ; mais, entre les arrêts, cette vitesse atteint 20 km. à l'heure.

Les locomotives sont du même type que celles employées entre l'Étoile et Saint-Germain et que nous avons décrites ; elles sont toutefois un peu plus puissantes ; le diamètre des cylindres a été augmenté et celui des roues motrices a été un peu diminué.

Voici les dimensions principales de ces locomotives qui sont au nombre de trois :

Diamètre des cylindres	0,350 m.
Course des pistons	0,300 —
Diamètre des roues	0,850 —
Diamètre intérieur de la chaudière	1,200 —
Longueur — —	4,200 —
Volume total de la chaudière	4 000 l.
Volume d'eau	3 600 —
Pression maximum	15 kg.
Timbre de la chaudière	16 —
Poids de la machine à vide	12 t.
— — en charge	15,6 t.

Le détendeur est le même que celui employé sur les locomotives de l'Étoile ; mais ce qui caractérise cette nouvelle locomotive, *dite à vapeur surchauffée*, et la différencie des types jusqu'alors adoptés, c'est la suppression du condenseur à air et son rempla-

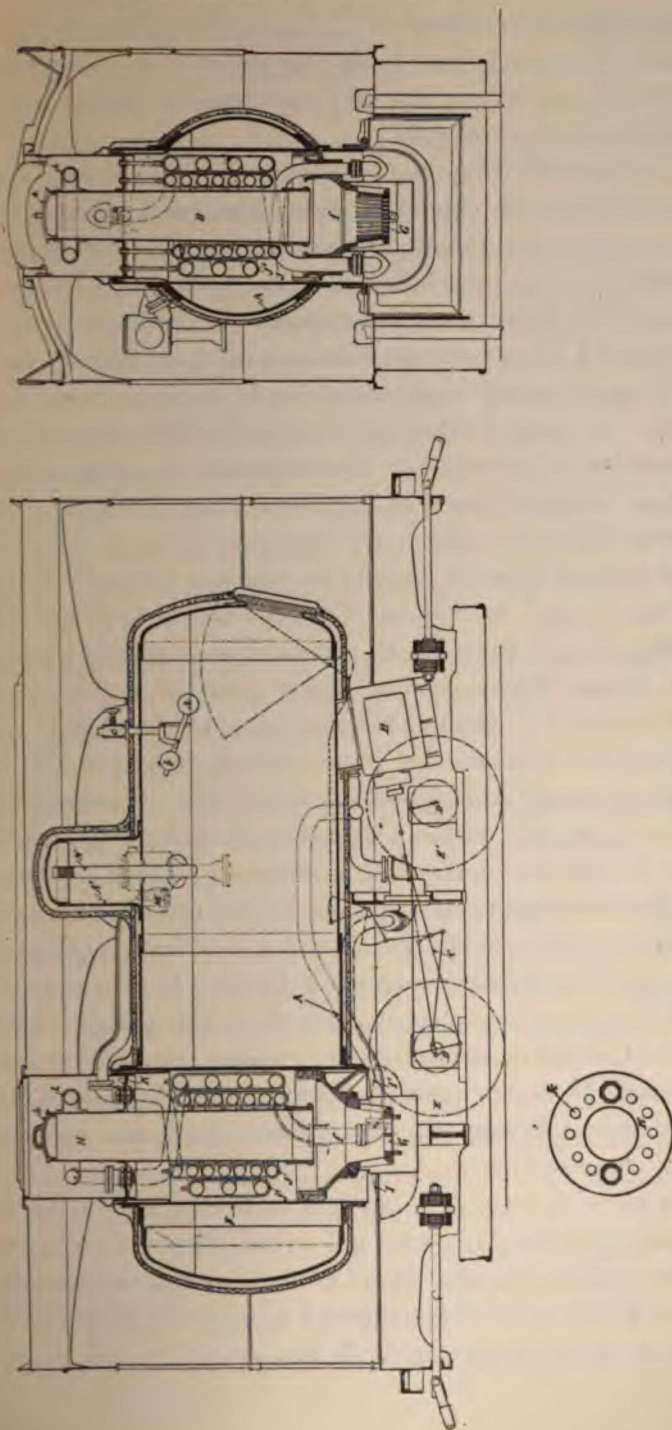


Fig. 32. — Locomotive du tramway de Poissy à Saint-Germain.

cement par un *surchauffeur de vapeur*. Vers l'une des extrémités, le récipient cylindrique A (fig. 32) est traversé par un gros tube vertical F qui est rivé sur lui d'une manière étanche et qui reçoit les appareils de surchauffe.

Ces appareils comprennent essentiellement un foyer conique *f*, une grille circulaire mobile G qu'on peut animer d'un mouvement de rotation intermittent ou continu, dans le but d'expulser les mâchefers et les escarbilles; un tube vertical de chargement de combustible H qui sera, de préférence, légèrement conique et qui est fermé à la partie supérieure par un couvercle *h*; des vannes I et I' que le mécanicien commande de sa plate-forme et qui permettent de régler l'entrée de l'air sous la grille, suivant le sens de la marche et l'intensité de la combustion et, finalement, les serpentins concentriques J et J' qui entourent le tube de chargement et sont en contact direct avec les gaz du foyer, celui interne J étant parcouru par la vapeur se rendant aux cylindres et celui externe J' par la vapeur d'échappement. Les gaz du foyer s'échappent par les trous K, percés dans la plaque horizontale K, et la vapeur d'échappement, après avoir été surchauffée dans le gros serpentin J', vient se mélanger avec les gaz chauds en sortant par les trous pratiqués sur le pourtour de la couronne L. De cette façon, la vapeur d'échappement surchauffée et mélangée aux gaz du foyer, qui sont encore à haute température, peut être complètement invisible à sa sortie de la locomotive; on évite ainsi le panache.

Il faut remarquer, en outre, que le petit foyer qui a été ajouté à la locomotive, dans le but de supprimer le panache, assure encore à cette machine d'autres avantages. En effet, la vapeur produite par l'eau du réservoir est surchauffée dans son passage dans le serpentin J, avant de se rendre aux cylindres, ce qui donne une réelle économie de vapeur pour un même travail et permet d'augmenter sensiblement la longueur du parcours pour une même quantité d'eau chaude.

En outre, le foyer placé au sein de la masse d'eau lui cède une certaine quantité de calories qui seront utilisées dans la zone supérieure de l'eau chaude, en créant à la surface une pression supérieure à celle qui correspondrait à la moyenne de température de toute la masse d'eau chaude du récipient.

Dans ce nouveau type de machine on a encore installé un indicateur de niveau d'eau à flotteur, qui permet de se rendre compte plus facilement du niveau de l'eau qu'à l'aide des robinets de jauge.

Cet appareil comprend un flotteur creux *a* et son contrepoids *b*, suspendu dans la chaudière, et une boîte *c* avec un cadran placé à l'extérieur du réservoir. Une tige verticale, entraînée dans les mouvements d'oscillation du flotteur, actionne une aiguille qui se déplace sur un cadran gradué. Avec cet appareil, on peut, au moment de la charge, régler avec certitude le niveau de l'eau.

Les voitures en service sur cette nouvelle ligne sont à bogies, et à intercirculation ; elles sont très élégantes, hautes, confortables et bien aménagées ; elles ont un roulement très doux.

Il y a deux types de voitures :

1° Des voitures mixtes de 1re et de 2e classe ; celles-ci contiennent 22 places de 1re et 28 places de 2e classe, soit un total de 50 places. Leur poids est de 5 600 kg. à vide, soit un poids de 112 kg. par place offerte.

L'éclairage est assuré par des lampes à pétrole et le chauffage par de petites chaufferettes installées dans le plancher, et dans lesquelles on brûle de la briquette.

Il y a trois de ces voitures.

2° Des voitures d'été de 2e classe contenant 60 places. Leur poids à vide est de 5 160 kg., soit 86 kg. par place offerte.

Il y a deux de ces voitures ;

L'effectif du matériel roulant est complété par deux fourgons destinés au transport des messageries ; deux plates-formes situées l'une à l'avant, l'autre à l'arrière peuvent recevoir des voyageurs. Leur poids à vide est de 2 800 kg. et la tare est de 3 000 kg., soit un poids en charge de 5 800 kg.

Tout le matériel est muni du frein à vide.

La résistance moyenne de la ligne est de 12,6 kg., en admettant un coefficient en palier et en alignement droit de 7,40 kg. ; ce dernier chiffre est obtenu en partant des chiffres de :

	Locomotive.	Voiture.
Rails saillants	9 kg.	5 kg.
Rails à ornières.	13,5 kg.	8,5 kg.

et en tenant compte des parties en rails saillants et en rails à

ornières, ainsi que de la répartition du poids du train entre la locomotive et les voitures. L'augmentation de résistance due aux efforts supplémentaires, courbes et arrêts, est donc de 5,2 kg.

Étant donné ce chiffre de 12,6 kg., nous pouvons facilement calculer le travail par kilomètre. Nous aurons, en supposant le train composé, comme il l'est généralement, d'une voiture mixte (1re et 2e cl.), d'une voiture d'été et d'un fourgon, et le nombre de places à moitié occupé :

$$T = \frac{12,6 \times 34 \text{ t.} \times 1\,000}{270\,000} = 1,59 \text{ chev.-h.}$$

Comme nous savons que la dépense en charbon d'un cheval-heure est de 3,12 kg. avec une pression d'admission de 3 kg., la dépense de charbon par kilomètre-train sera de :

$$\frac{1,59 \times 3,12}{0,85} = 5,80 \text{ kg.};$$

en supposant pour l'appareil moteur un rendement de 0,85.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-TRAIN

Nous admettons, pour établir ce prix, que le train se compose normalement de trois voitures pesant chacun 8 t., remorquées par une locomotive de 16 t., soit un poids total de 40 t. Cette composition représente le train type du tramway de l'Étoile à Saint-Germain.

Les dépenses pourront se répartir comme suit :

1° Combustible (voir p. 81) 7,05 kg. à 0,025 fr. .	0,176 fr.
2° Matières pour graissage, nettoyage et éclairage. .	0,020 —
3° Entretien du matériel de traction : moteurs et générateurs, voitures et matériel des ateliers. Salaire du personnel des ateliers et fourniture de matières premières	0,130 —
4° Salaire des mécaniciens	0,080 —
Dépense totale de traction par kilomètre-train .	0,406 fr.

Soit, par **kilomètre-voiture** : $\frac{0,406}{3} = 0,135$ fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites il faut ajouter les dépenses dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 km., ayant 30 voitures dont 20 en service, parcourant chacune 150 kil. par jour, peuvent s'établir comme suit :

1° Bâtiments des dépôts et ateliers (sans le terrain), remises	60 000 fr.
2° Générateurs et installations diverses	70 000 —
3° Outillage des ateliers	15 000 —
4° Prises d'eau supplémentaires et installations supplémentaires propres au service	20 000 —
5° 30 voitures à 7 000 fr. l'une	210 000 —
6° 10 machines de 16 t. à 25 000 fr.	250 000 —
Total	625 000 fr.

Ce qui représente, pour un parcours annuel *par voiture* de 1.000,000 de kil. :

$$\frac{625\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0,062 \text{ fr.}$$

La dépense totale de traction par *kilomètre-voiture* sera donc : 0.135 fr. + 0,062 = 0,197 et par *kilomètre-train* de : 0,197 fr. × 3 = 0,591 fr.

TRACTION PAR L'AIR COMPRIMÉ

Une machine à vapeur, actionnant des compresseurs, refoule dans des accumulateurs, installés dans une usine centrale, de l'air à une certaine pression. Cet air comprimé est ensuite transvasé dans d'autres réservoirs placés sur les véhicules et sert ensuite à produire la force motrice de ces derniers, en agissant dans des cylindres actionnant les essieux. Avant que l'air contenu dans le réservoir des véhicules soit épuisé, ceux-ci reviennent à l'usine ou à des points fixes de chargement, pour y renouveler leur approvisionnement. Tel est le principe de la traction par l'air comprimé.

L'idée de ce système paraît très ancienne puisque Papin, l'inventeur de la chaudière à vapeur, y songeait dès 1687. Mais ce n'est, cependant, que vers 1838 que Andraud et Tessié du Motay essayèrent de mettre cette idée en pratique. Andraud avait étudié à fond la question, et, chose très curieuse, on retrouve dans ses mémoires la trace de tous les perfectionnements actuels qui ont rendu ce système de traction applicable. On y retrouve l'idée de la compression étagée, du réchauffage de l'air avant son emploi, du détendeur de vapeur et des accumulateurs de réserve dont nous parlerons plus loin. Andraud et Tessié du Motay firent construire, vers 1840, une voiture automotrice à air comprimé; mais, pour diverses raisons, ce premier essai n'eut pas de suite et la traction par l'air comprimé tomba dans l'oubli.

En 1872, M. Mékarski reprit cette idée en la perfectionnant et la

endit pratique par le réchauffage de l'air au moyen de la vapeur. Il en a fait, à la fin de 1875 et dans le courant de 1876, une première application et, depuis, celles-ci sont devenues assez nombreuses.

On trouve la traction mécanique par l'air comprimé, en France, aux tramways de Nantes, aux tramways Nogentais, à Aix-les-Bains, à Vichy et à la Compagnie générale des Omnibus, sur les tramways de Louvre-Saint-Cloud-Versailles, de Saint-Augustin-Cours de Vincennes, ainsi qu'aux tramways d'Arpajon, dans l'intérieur de Paris. La Compagnie générale des Omnibus doit appliquer ce système de traction à 3 ou 4 nouvelles lignes.

A l'étranger on en trouve des applications en Suisse et aux États-Unis.

Dans ce système de traction nous avons donc :

1° A comprimer de l'air dans les accumulateurs de l'usine centrale, à une certaine pression. Quel sera le travail nécessaire pour produire cette compression et quel sera le taux de compression le plus avantageux ?

2° A prendre dans ces accumulateurs l'air qui y est comprimé et à l'introduire à la même pression dans les réservoirs des voitures, soit à l'usine centrale, soit à certains points déterminés du réseau ;

3° Enfin, à employer cet air emmagasiné dans les réservoirs des voitures, pour obtenir la force motrice nécessaire à la propulsion de ces voitures. Quel sera le travail que nous obtiendrons par la détente de cet air et dans quelles conditions devra-t-il se trouver pour donner le meilleur rendement? Quel sera ce rendement et, par conséquent, quelle sera la dépense d'air à faire pour la traction des voitures? Nous allons examiner ces différentes questions.

Compression. — La compression de l'air peut se faire de trois façons différentes :

Dans le premier cas, la température de l'air est variable pendant la compression; nous avons alors la compression adiabatique; c'est le cas où on n'opère aucun refroidissement du cylindre ou de l'air pendant la compression.

Dans le second cas, la température de l'air reste à peu près cons-

tante pendant la compression ; c'est la compression isothermique où, pendant cette compression, on refroidit le cylindre et l'air.

Dans le troisième cas, la compression est étagée et divisée en deux ou trois phases avec refroidissement du cylindre et de l'air dans chacune des phases. C'est ce dernier système qui, comme nous le verrons dans la suite, donne les résultats les plus avantageux.

Nous allons chercher, dans ces différents cas, le travail nécessaire pour comprimer 1 kg. d'air de la pression atmosphérique à la pression p, en nous servant des formules générales que nous rappelons ci-desous :

1° Travail nécessaire pour comprimer *adiabatiquement* 1 kg. d'air pris à la température t de la pression atmosphérique à la pression p_1 :

$$\mathcal{T} = 102{,}69\ (t_1 - t);$$

formule dans laquelle t_1 est la température absolue finale obtenue après la compression, c'est-à-dire : $273 + t_1$; de même $t = 273 + t$.

Les températures sont liées aux pressions par la formule :

$$\frac{t}{p^{0,29}} = \frac{t_1}{p_1^{0,29}}\ ;\ \text{d'où} : t_1 = t\left(\frac{p_1}{p}\right)^{0,29}.$$

2° Travail nécessaire pour comprimer *isothermiquement* 1 kg. d'air pris à la température t, de la pression atmosphérique à la pression p_1 :

$$\mathcal{T}_1 = 29{,}28\ (273 + t)\ \text{log nép.}\ p_1.$$

3° Dans le troisième cas, avec compression étagée, injection d'eau pendant la compression et refroidissement entre chaque étage, on obtient une compression qui se rapproche presque entièrement de la compression isothermique.

En effet, soit la figure 33 où la ligne de représente la compression adiabatique et la ligne df la compression isothermique.

La compression se fera en trois étages de 1 kg. à a kg., de a kg. à b kg. et enfin de b kg. à c kg.

Pendant la compression dans le premier étage, par suite du refroidissement du cylindre et de l'injection de l'eau, la compression se fera suivant une courbe $d - 1$, intermédiaire entre la com-

pression adiabatique et la compression isothermique et se rapprochant d'autant plus de celle-ci que le refroidissement de l'air pendant la compression sera plus complet. L'air comprimé dans cette première phase est alors introduit dans un réservoir de 80 litres, où il se refroidit pour reprendre sa température primitive ; il occupera donc, avant la deuxième phase, le même volume *a m* que si la compression eût été isothermique.

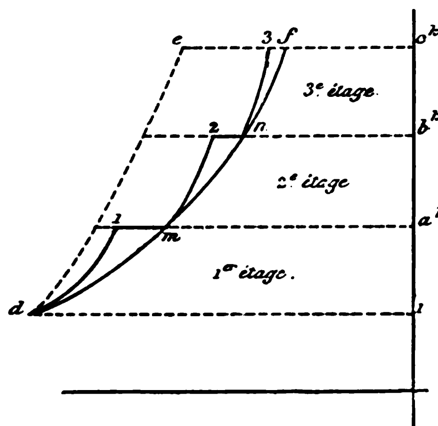


Fig. 33.

Les mêmes phénomènes se reproduisent dans les étages suivants et la compression totale se fera suivant l'échelle *d*, 1, *m*, 2, *n*, 3, *f*, échelle qui se rapproche d'autant plus, comme nous l'avons dit, de la courbe isothermique, que ce nombre d'étages sera plus grand et que le refroidissement, pendant la compression, sera lui-même plus grand.

Le nombre des étages est limité en pratique, car son augmentation multiplie les organes de la machine et, par conséquent, diminue le rendement. De plus, les soupapes d'aspiration et de refoulement deviennent plus nombreuses et, comme chacune de ces soupapes, soit à l'aspiration, soit à la compression, exigent un certain effort d'ouverture ou de fermeture, il en résulte une nouvelle perte de travail. En multipliant les étages, on arriverait à perdre le bénéfice de l'étagement.

La pratique a fait admettre un étagement de 2 phases jusqu'à 50 kg. et un étagement de 3 phases entre 50 et 80 kg. et même au-dessus.

Le meilleur résultat est obtenu lorsqu'un même rapport est donné aux compressions successives et, dans ce cas, ce rapport, par chaque étage, est donné par la formule :

$$R = \sqrt[n]{P} ;$$

dans laquelle P représente la pression finale et n le nombre d'étages.

Ainsi, soit à comprimer de l'air à 80 kg. en trois étages, on aura :

$$R = \sqrt[3]{80} = 4{,}31.$$

Dans le premier cylindre, on aura une pression finale de 4,31 kg., dans le second cylindre une pression finale de $4{,}31 \times 4{,}31 = 18{,}50$ kg. et dans le troisième cylindre une pression finale de $18{,}50 \times 4{,}31 = 80{,}00$ kg.

D'après ce qui précède on voit donc que, lorsque le refroidissement de l'air pendant la compression est aussi complet que possible, il est permis d'admettre, pour le travail de compression dans le système étagé, les formules qui servent pour le calcul du travail, dans le cas de la compression isothermique.

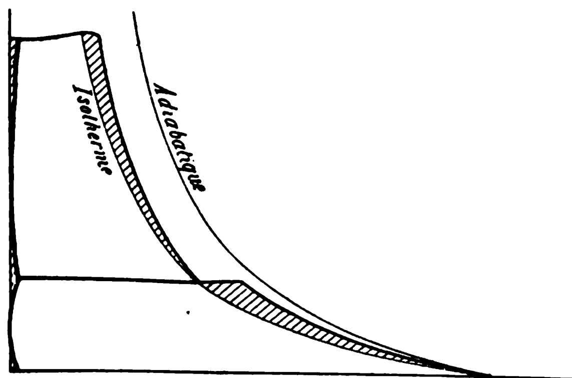


Fig. 34.

Comme exemple du résultat obtenu avec ce système de compression, nous représentons, figure 34, la courbe relevée sur les compresseurs de la Compagnie parisienne d'air comprimé, établis à l'usine du quai de la gare à Paris, où la compression à 6 atmosphères se fait en deux étages.

[illegible] établi, quel sera le travail nécessaire pour comprimer [illegible] l'air pris à la température initiale de 12° C., mais s'élevant pendant la compression isothermique à 50° C., aux différentes pressions de [illegible] 50, 60 et 80 kg., suivant que la compression sera

adiabatique ou isothermique, celle-ci étant admise pour le système de compression par étages.

Nous avons pris ces taux de compression, parce que ce sont ceux qui ont trouvé des applications dans la traction des tramways.

Le tableau suivant donne les chiffres résultant de ces calculs :

Pression finale.	Compression isothermique.	Compression adiabatique.
30 kg.	32 100 kgm.	49 250 kgm.
50 —	37 000 —	61 500 —
60 —	38 700 —	66 681 —
80 —	41 500 —	74 894 —

On voit de suite, en examinant ce tableau, la différence considérable qu'il y a dans le travail nécessaire à la compression d'un kilogramme d'air, suivant que cette compression est adiabatique ou isothermique. Pour une pression de 80 kg. le travail est presque doublé. On voit donc aussi l'intérêt des étagements et du refroidissement de l'air pendant la compression, soit par des injections d'eau, soit autrement.

Divers procédés ont en effet été étudiés dans ce but, et nous les rappellerons en quelques mots.

On peut refroidir le cylindre compresseur par une circulation d'eau autour de ses parois. Dans certaines conditions de marche, c'est-à-dire lorsque les pompes marchent lentement, que le poids d'air comprimé est faible ainsi que le taux de compression, on peut par ce procédé obtenir un certain abaissement de température; mais la masse intérieure de l'air dans le cylindre est peu influencée et sa température reste très élevée; c'est là le principal défaut de ce système de refroidissement. De meilleurs résultats sont obtenus en mélangeant de l'eau avec l'air par injection dans le cylindre, pendant la compression; la masse totale d'air est ainsi mieux refroidie.

M. Mallard, ingénieur des Mines, a étudié complètement cette question dans un important mémoire publié en 1867 dans le Bulletin de l'Industrie Minière; il a montré combien la température finale s'abaissait, en même temps que le travail de compression, lorsque l'air à comprimer était saturé par une injection d'eau. D'après ses calculs, cette quantité d'eau à injecter est d'environ

20 grammes pour 1 atmosphère et de 66 grammes pour 7,5 atmosphères, par kilogramme d'air à comprimer.

M. Colladon qui, le premier, appliqua ce système d'injection d'eau aux pompes de compression du Gothard, refoule, au moyen d'une pompe spéciale, de l'eau, comprimée à une pression supérieure à celle de l'air, dans le cylindre; cette eau comprimée y arrive par de petites ouvertures percées dans les fonds du cylindre; ces ouvertures sont inclinées et débouchent en face l'une de l'autre, de manière à pulvériser l'eau d'injection.

La masse totale d'air contenue dans le cylindre est ainsi parfaitement mise en contact avec l'eau, et cela pendant toute la compression, ce qui est très important.

Un autre fait qui n'est pas à négliger, c'est que le travail de compression diminue à mesure que la température initiale de l'air à comprimer diminue elle-même ; il y a donc tout avantage à prendre l'air à l'extérieur et non pas dans l'endroit, généralement chaud, où se trouvent les pompes de compression. Il est un fait bien connu, c'est que le rendement des compresseurs augmente en hiver, l'air étant plus froid pendant cette saison.

Le refroidissement de l'air dans les cylindres a encore un autre avantage, c'est de faciliter le graissage qui, aux températures élevées, devient très difficile, les huiles de graissage, même les meilleures, se décomposant à ces températures très élevées [1].

Les chiffres que nous avons donnés plus haut donnent le travail *théorique* nécessaire pour comprimer un kilogramme d'air ; mais les compresseurs ne donnent pas ce travail théorique; il doit être multiplié par un coefficient de rendement ; quel est ce coefficient de rendement ?

Des expériences récentes, faites avec les compresseurs de l'usine du quai de la Gare de la Compagnie Parisienne de l'air comprimé, ont donné des rendements très élevés, s'élevant jusqu'à 80, 84 p. 100; mais ces machines sont très puissantes, d'une force de 2 000 chevaux, et la compression finale n'est que de 5 kg. effectifs avec un étagement à double phase.

[1] M. Mékarski emploie du *savon mou* pour le graissage, afin d'éviter l'entraînement de l'huile dans les réservoirs où elle se décompose et peut donner lieu à des explosions.

Pour le service des tramways les compressions sont beaucoup plus élevées et, par conséquent, les phases de l'étagement doivent être plus nombreuses. On a fait en 1895 à l'usine de la Villette, qui sert à l'alimentation des tramways de Saint-Augustin au Cours de Vincennes (Compagnie générale des Omnibus), des expériences très complètes qui ont donné un rendement de 64 p. 100 ; dans cette usine la compression à 60 kg. se fait en trois phases. Nous prendrons donc le chiffre de 0,65 pour les compressions élevées, comme c'est le cas général des tramways, avec compression à trois étages. Lorsque la pression sera inférieure à 50 kg. et que la compression à deux étages sera employée, le rendement sera un peu plus grand et on pourra admettre dans ce cas le chiffre de 0,70.

Si on veut obtenir le travail à produire pour la compression dans les cylindres de la machine actionnant les compresseurs, il faudra encore affecter notre résultat d'un coefficient qui sera celui de la machine à vapeur. On peut admettre pour ce coefficient le chiffre de 0,85.

Ces chiffres étant admis, nous pouvons établir maintenant le tableau suivant, qui donnera en kilogrammètres le travail à produire pour la compression isothermique de 1 kg. d'air, dans le cylindre du compresseur et dans le cylindre de la machine à vapeur :

Pression finale.		Travail dans le compresseur.	Travail dans le cylindre de la machine à vapeur.
30 kg.	2 étages coef. 0,70	45 857 kgm.	53 900 kgm.
50 —		52 857 —	62 000 —
60 —	3 étages coef. 0,65	59 539 —	70 000 —
80 —		63 846 —	75 000 —

Ces résultats nous permettent de calculer le nombre de kilogrammes d'air qu'un cheval-heure, soit dans le compresseur, soit dans le cylindre de la machine à vapeur, pourra comprimer. Nous obtiendrons ainsi le tableau suivant :

Pression finale.	NOMBRE DE KILOGRAMMES D'AIR COMPRIMÉS PAR CHEVAL-HEURE DANS : Compresseur.	Cylindre de la machine à vapeur.
30 kg.	5,90 kg.	5,05 kg.
50 —	5,10 —	4,35 —
60 —	4,55 —	3,86 —
80 —	4,25 —	3,60 —

Ces chiffres sont ceux qui peuvent être obtenus avec de bonnes machines, bien réglées, et où le refroidissement pendant la compression a lieu par injection d'eau, de manière à avoir une compression se rapprochant le plus possible de la courbe isothermique; ils ne s'éloignent guère de la pratique, et ce sont ceux qui nous serviront dans la suite.

Quelle sera maintenant la pression maximum la plus avantageuse à employer? Nous abordons ici une question sur laquelle on est loin d'être d'accord, quoique cependant les pressions élevées paraissent de plus en plus employées.

Avec des pressions élevées on peut emmagasiner dans les voitures, sous un petit volume, un poids d'air suffisant pour parcourir une assez grande distance sans renouvellement. Mais, d'un autre côté, le travail de compression augmente et, en même temps, la perte inévitable entre la pression dans les accumulateurs et la pression d'admission dans les cylindres moteurs de la voiture, pression variable il est vrai, suivant la charge et le profil, mais qui cependant ne dépasse généralement pas 15 kg. sur la ligne de Saint-Augustin. Enfin, avec des pressions supérieures à 50 kg. la robinetterie devient d'une construction plus difficile et exige des soins minutieux.

Avec des pressions faibles, de 15 à 20 kg., comme le propose M. Popp, on évite une partie de ces inconvénients, mais on retombe dans une difficulté peut-être plus grave. Les renouvellements d'air devenant plus fréquents, il faut multiplier les endroits de chargement et, par conséquent, augmenter le personnel et par suite les frais de traction. M. Popp a bien imaginé des appareils automatiques pour ces chargements, mais ils semblent bien compliqués et n'ont pas jusqu'ici subi l'épreuve de la pratique.

Quelques ingénieurs semblent préconiser des pressions moyennes, c'est-à-dire des pressions de 50 kg. L'expérience seule pourra amener à une solution définitive.

Nous dirons toutefois que la pression admise à Nantes est de 30 kg. (on va mettre prochainement en service de nouvelles voitures qui se chargeront à 50 kg.); aux tramways Nogentais, de 45 kg. ; sur le tramway de Saint-Augustin-Cours de Vincennes, 60 kg., et sur la ligne de Louvre-Boulogne-Versailles, de 80 kg.

Avant de terminer la partie qui a trait à la compression, nous croyons intéressant de dire quelques mots de la machine de compression à trois étages étudiée par M. Mékarski et destinée à comprimer de l'air jusqu'à la pression de 80 kg. C'est ce type de machine qui est en service dans les usines de la Compagnie générale des Omnibus, ainsi qu'aux chemins de fer Nogentais et d'Arpajon. Nous extrayons cette description de la notice de M. Barbet[1].

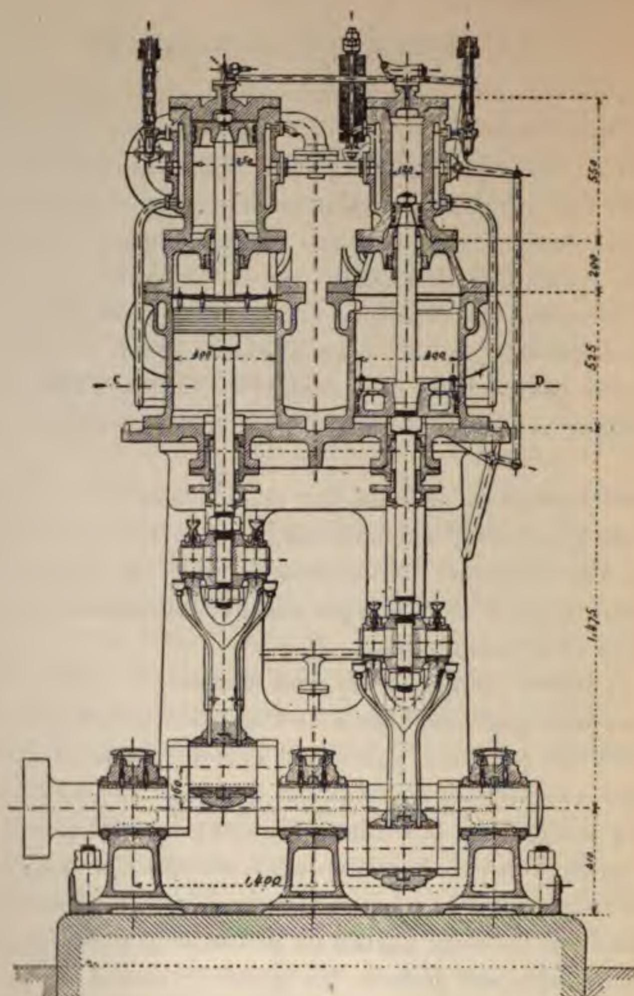
Le compresseur (fig. 35) est vertical et reçoit son mouvement d'un arbre horizontal à deux manivelles calées à 180°, porté par trois paliers venus de fonte avec le plateau formant la base du bâti.

L'arbre moteur est actionné par une machine à vapeur, soit verticale, du type pilon, soit horizontale avec distribution du genre Corliss. Ces machines font généralement de 80 à 100 chevaux à une allure de 100 à 150 tours par minute. Le volant est placé entre le moteur et le compresseur.

Les cylindres compresseurs sont soutenus en porte à faux par deux supports quadrangulaires en fonte, boulonnés sur le plateau horizontal qui porte les paliers de l'arbre moteur. Il y a quatre cylindres compresseurs travaillant à simple effet, montés deux à deux en tandem. La face inférieure des pistons du bas travaille, tandis qu'au contraire la compression est effectuée dans les cylindres du haut par la face supérieure du piston. L'effort ainsi développé pendant les deux parties de la course peut être égalisé. La course commune des pistons des quatre cylindres est de 0,32 m. et la compression s'effectue en trois étages.

Les deux cylindres inférieurs de 0,40 m. de diamètre aspirent dans l'atmosphère ; ils portent chacun, à leur partie inférieure, deux soupapes d'aspiration et une de refoulement. Ces soupapes sont horizontales et munies de ressorts bien réglés. Après cette première compression, l'air est refoulé par les deux cylindres inférieurs dans un premier réservoir intermédiaire de 0,395 m. de diamètre et de 1 m. de hauteur, à l'aide de deux tuyaux en col de cygne partant de la partie supérieure des chapelles de refoulement et aboutissant sur le côté du réservoir.

[1] *L'air comprimé appliqué à la traction des tramways.*



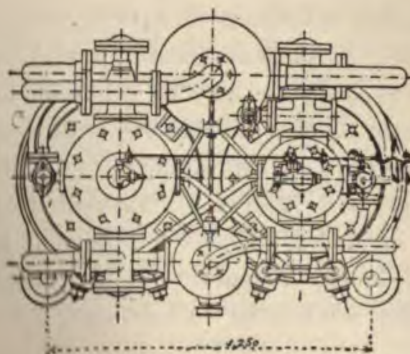


Fig. [illegible] — Compresseur à trois étages. Système Mékarski.

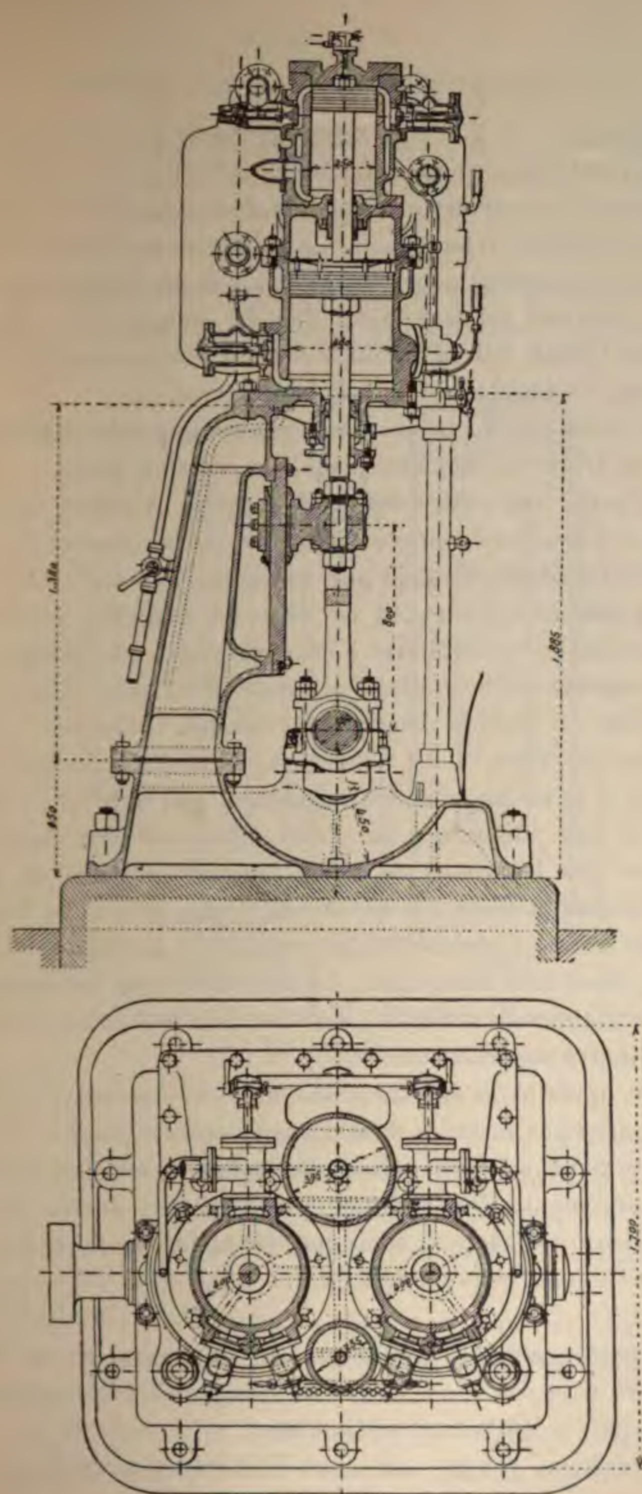


Fig. 35. — Compresseur à trois étages. Système Mékarski.

L'air est aspiré à la partie supérieure de ce premier réservoir par le cylindre supérieur de gauche, dont le diamètre est de 0,25 m.; il est muni à sa partie supérieure de deux soupapes, l'une d'aspiration, l'autre de refoulement. Ce cylindre est fermé et sa partie inférieure communique constamment par un tuyau avec le premier réservoir intermédiaire. Par la soupape de droite, ce cylindre refoule l'air dans un second réservoir intermédiaire, de 0.235 m. de diamètre et de 1 m. de hauteur.

L'air est aspiré de ce deuxième réservoir par le cylindre supérieur de droite et comprimé jusqu'à la pression finale.

A la partie supérieure des deux derniers cylindres sont installées des soupapes de sûreté munies de leurs ressorts. On obtient le refroidissement de l'air par addition d'eau à l'aspiration des deux premiers cylindres. A cet effet, les chapelles des soupapes d'aspiration de ces cylindres à basse pression, sont munies, à leur partie supérieure, de godets dans lesquels on laisse tomber un filet d'eau dont on règle le débit par un robinet. L'eau suit l'air à travers les soupapes et les réservoirs, y est constamment brassée avec lui et le mélange se fait intimement; en outre les expulsions d'air se font toujours à la partie supérieure des chapelles, de manière que les soupapes soient toujours noyées, ce qui a le triple avantage d'obtenir un mélange plus parfait de l'eau et de l'air, de rendre l'étanchéité plus complète et de réduire les espaces morts, chose très importante. Le refroidissement est complété par une circulation d'eau froide, dans une double enveloppe entourant les cylindres supérieurs.

L'air, après avoir été comprimé, doit être emmagasiné dans des réservoirs fixes installés dans l'usine centrale pour servir à l'alimentation des voitures, soit à cette usine, soit en des points fixes de chargement. Nous allons nous occuper de ces réservoirs et de leurs accessoires, ainsi que des appareils de chargement à l'usine centrale et aux points fixes.

Accumulateurs et appareils de chargement. — Avant de pénétrer dans les réservoirs, l'air comprimé doit traverser deux appareils : le sécheur et le déverseur.

Le sécheur, comme son nom l'indique, a pour but de débar-

rasser l'air de la plus grande partie de l'eau qu'il peut contenir et qui a pu s'y accumuler pendant la compression. Il se compose (fig. 36) d'un cylindre en tôle d'acier de 0,60 m. de diamètre et de 2 m. de hauteur divisé en deux parties par le diaphragme C; ces deux parties communiquent entre elles au moyen d'un tube A. L'air arrive des pompes par l'ouverture M, vient frapper la sur-

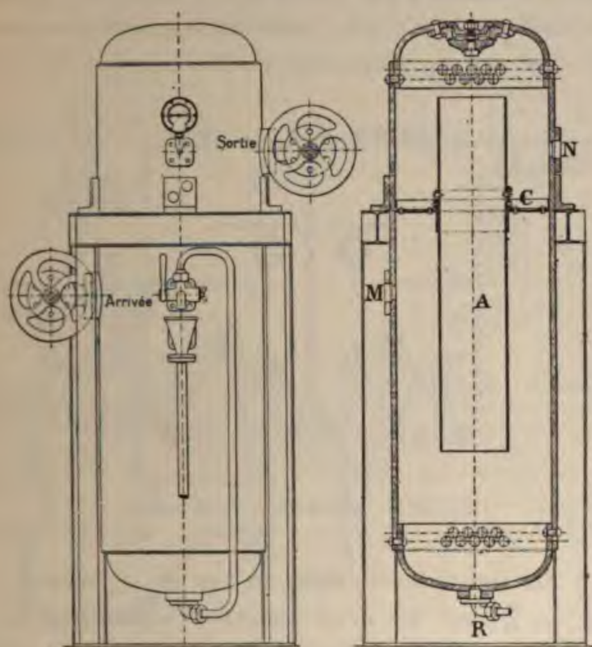


Fig. 36. — Sécheur.

face extérieure du tube A, descend à la partie inférieure du réservoir et remonte, par ce même tube A, dans la division supérieure du sécheur, d'où il s'échappe par l'ouverture N. L'eau, dans sa course, se dépose à la partie inférieure d'où on peut l'extraire au moyen du robinet de purge R.

En général, on installe deux sécheurs à la suite l'un de l'autre ; mais ils peuvent agir ensemble ou séparément, au moyen de robinets disposés à cet effet.

A la suite du sécheur se trouve le déverseur, qui a pour but de ne permettre la communication entre les différentes parties de la

canalisation d'air comprimé qu'à une pression fixe et déterminée, mais qui ne peut jamais dépasser la pression limite fixée par les soupapes de sûreté des pompes de compression et des accumulateurs.

La figure 37 montre l'installation d'un déverseur. L'air comprimé, venant des sécheurs, se rend directement à la rampe de chargement des voitures par le tuyau *a n g*. Il se rend aux accumulateurs, soit par *a b c d e f*, en traversant le déverseur *c*, soit par *a n b' c' d' e f*, en traversant le déverseur *c'*. On peut ainsi

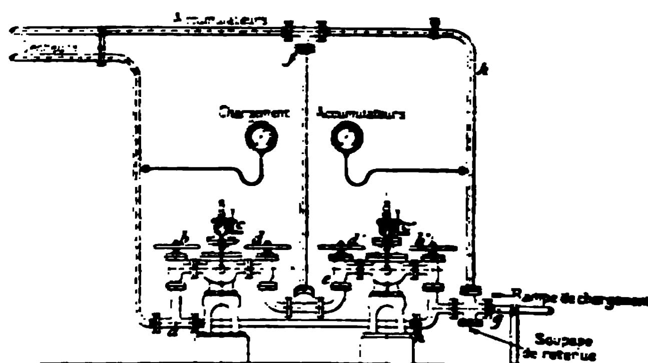


Fig. 37. — Installation du déverseur.

isoler l'un des deux déverseurs, en cas de réparation ; il suffit, pour cela, de fermer les deux robinets-vannes *b d* ou *b' d'* de l'appareil qu'on veut isoler. Un tuyau *f h g* réunit directement les accumulateurs avec la rampe de chargement, et une soupape pressée de bas en haut par un ressort, et placée en *g*, intercepte la communication entre ce tuyau et la rampe de chargement, dès que l'équilibre est établi entre les accumulateurs et les réservoirs des voitures.

Le déverseur (fig. 38) se compose d'une cloche A formant robinet, séparant les deux canalisations B et C ; cette cloche est fermée par l'intermédiaire d'un caoutchouc D sur lequel agit l'eau contenue en E. Cette eau est comprimée par le piston creux F qui peut s'abaisser plus ou moins, au moyen de la vis G, manœuvrée par le volant H ; ce piston F contient une petite quantité d'air. Le fond du réservoir E est percé de trous et toute

pression agissant en E se communiquera au caoutchouc D, et par suite au robinet d'admission d'air A. Son ouverture dépendra de la pression produite en E au moyen du volant et sera donc à la disposition du mécanicien.

Lorsque la rampe de chargement est fermée et qu'aucune alimentation de voiture n'a lieu, l'air comprimé, venant des sécheurs, se rend directement dans les réservoirs accumulateurs, en passant par l'un des déverseurs *c* ou *c'*, à la volonté du méca-

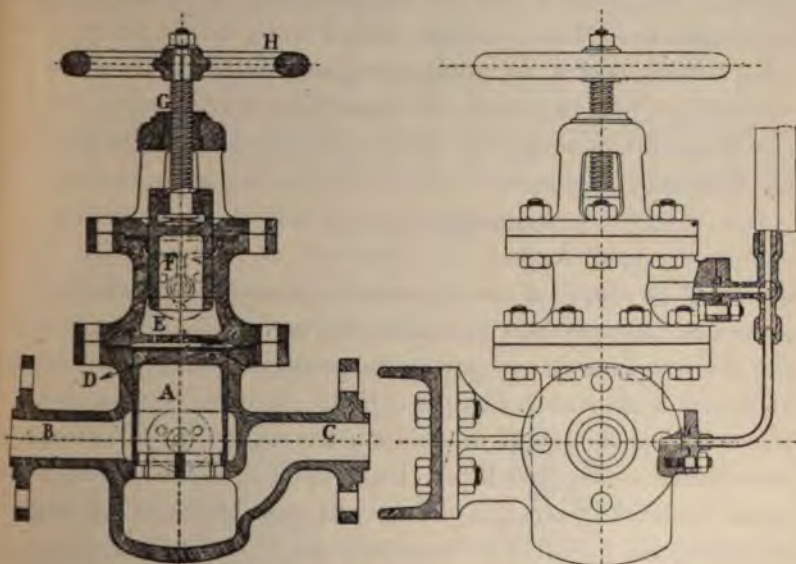


Fig. 38. — Déverseur.

nicien qui, pour cela, n'aura qu'à manœuvrer les robinets-vannes *bd* ou *b'd'* ; cet air arrivera dans les réservoirs à la pression maximum de compression ; il se détendra jusqu'à la pression des accumulateurs mêmes et ne pourra dépasser la pression correspondant à la charge des soupapes de sûreté du compresseur et du dernier accumulateur de chaque batterie. Si des voitures sont en chargement, la pression diminuera de suite dans la conduite directe *a n g* venant des sécheurs. La pression dans les accumulateurs est alors supérieure à cette dernière ; la soupape placée en *g* s'ouvrira, et l'alimentation des voitures se fera par les réservoirs accumulateurs.

Pendant ce temps, la pompe de compression continuant à fonctionner, la pression dans le tuyau *a n g* se relèvera et deviendra égale à celle des accumulateurs, qui a diminué d'une certaine quantité pendant l'approvisionnement des voitures. A ce moment, la soupape *g* se fermera et ce sera la pompe de compression qui fournira directement l'air nécessaire à l'alimentation de ces voitures. Toutefois la pression atteinte ne pourra jamais dépasser la pression fixée par le déverseur. Lorsqu'elle sera égale à ce chiffre, l'air produit par les compresseurs se rendra dans les accumulateurs. Donc, comme nous l'avons dit, la pression, soit dans les réservoirs accumulateurs, soit dans les réservoirs des voitures, ne pourra jamais être supérieure à celle qui a été fixée. Cet appareil très simple et à la fois très ingénieux a été étudié par M. Mékarski.

Les réservoirs accumulateurs, servant à emmagasiner l'air comprimé, sont formés de cylindres en tôle d'acier réunis ensemble au moyen d'une tuyauterie, de manière à former une ou plusieurs batteries dont le nombre devra varier, suivant la quantité d'air à fournir et, par conséquent, suivant le nombre de véhicules à alimenter. Chaque cylindre, formant élément de batterie, a généralement 0,60 m. de diamètre et 2,30 m. de hauteur ; sa contenance est de 500 litres. Un tampon autoclave, ménagé à la partie supérieure, sert à la visite et aux réparations, et une soupape de sûreté est installée à l'extrémité du tuyau d'alimentation de chaque batterie. La figure 39 montre la disposition de deux batteries de 5 éléments chacune.

Les rampes de chargement dans l'usine centrale sont généralement installées contre un mur formant l'extrémité d'un hangar où sont disposées, perpendiculairement à ce mur, des voies avec fosses pour y recevoir les véhicules à charger. Ces rampes de chargement se composent de deux tuyaux avec robinets formant bouche de chargement : l'un pour l'air comprimé, l'autre pour la vapeur, dont nous expliquerons plus loin l'usage.

La figure 40 montre la disposition de ces bouches de chargement. Les robinets sont mobiles autour d'un axe horizontal et se terminent par un serpentin en cuivre rouge, ce qui facilite la jonction avec le raccord fixe de la voiture.

Le renouvellement de l'air des voitures ne peut pas toujours se faire à l'usine centrale ; dans certaines circonstances, assez fréquentes du reste, ce renouvellement doit se faire à des points

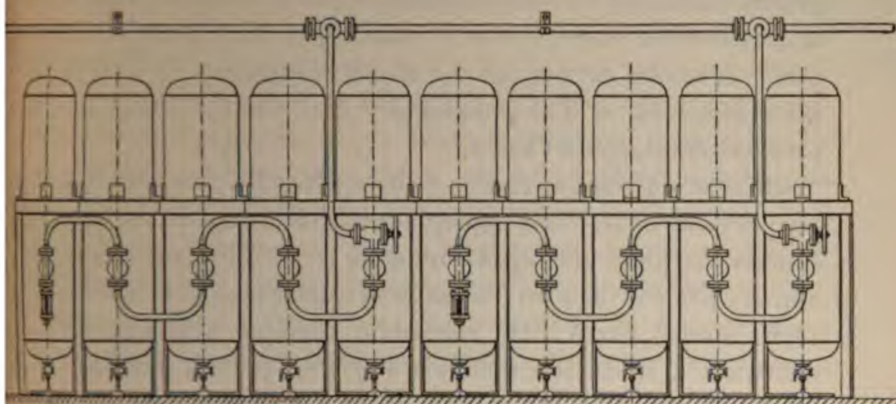


Fig. 39. — Batterie d'accumulateurs.

intermédiaires et déterminés de la ligne à exploiter. Il faut donc amener à ces points, au moyen d'une canalisation, l'air comprimé et la vapeur. Quelquefois même cette canalisation a une

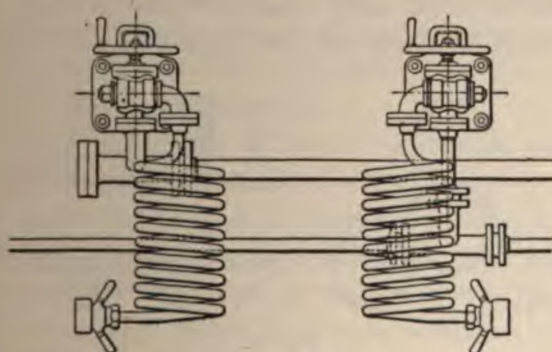


Fig. 40. — Bouches de chargement.

longueur importante ; ainsi, pour la ligne de Paris-Versailles de la Compagnie générale des Omnibus, la canalisation, entre Boulogne et Sèvres, a une longueur de 4 200 m. et doit conduire de l'air comprimé à la pression de 80 kg.

On pourrait craindre, avec les hautes pressions employées, une

perte de charge considérable entre les deux extrémités de la canalisation ; mais avec des diamètres de tuyaux bien proportionnés, cette perte de charge se réduit à peu de chose et c'est un des grands avantages de l'air comprimé à haute pression. Ainsi, pour la canalisation entre Sèvres et Boulogne, dont nous venons de parler et où les tuyaux ont un diamètre intérieur de 0,06 m., la perte de travail est d'un peu plus de 1/2 p. 100 du travail de compression développé à l'usine.

On peut du reste se rendre compte, dans les différents cas, de ces pertes de charge, en appliquant une des nombreuses formules établies par plusieurs ingénieurs dans ce but. Nous ne les reproduirons pas ici, mais on les trouvera condensées dans le mémoire de M. Barbet sur « l'Air comprimé appliqué à la traction des tramways ». Il est bon toutefois d'ajouter que ces formules sont basées sur des expériences faites à de faibles pressions, ne dépassant pas généralement 6 kg., et que, pour les hautes pressions, elles donnent presque toujours des résultats assez approximatifs et presque toujours supérieurs aux pertes de charge réelles.

Jusqu'à ces derniers temps on employait assez généralement pour la canalisation des tuyaux en fonte ; mais actuellement, ceux-ci sont en acier doux soudé par recouvrement; leur prix n'est guère plus élevé que celui des tuyaux en fonte. La figure 41

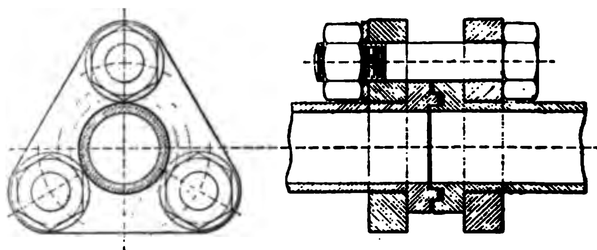


Fig. 41.

montre la disposition des tuyaux et du joint adopté pour la canalisation de Boulogne-Sèvres. Le tuyau, de 0,06 m. de diamètre, a une épaisseur de 7,5 mm. Le joint est fait au moyen de brides mobiles réunies par trois boulons, et l'étanchéité est obtenue par l'interposition dans la gorge, indiquée sur la figure, d'un anneau de plomb ou de cuivre rouge.

Le chargement sur la voie publique, à des points déterminés, se fait suivant des dispositions presque semblables à celles de l'usine centrale. A la Compagnie générale des Omnibus, à la Villette, un robinet est fixé sur chacune des conduites d'amenée de la vapeur et de l'air comprimé ; ces robinets sont installés dans un regard maçonné placé au-dessous du niveau de la chaussée. Sur chacun des robinets est branché un serpentin en cuivre rouge d'une hauteur suffisante pour atteindre le niveau du robinet de chargement de la voiture ; en général 1 mètre. Ce serpentin est terminé par un raccórd, muni d'une rondelle en caoutchouc ou d'une garniture emboutie en ébonite, qui permet sa jonction avec le raccord de la voiture, raccord, du reste, facilité par la flexibilité du serpentin.

Lorsque, dans certains cas exceptionnels, la distance entre l'usine centrale et la bouche de chargement sur la voie publique devient un peu considérable, il est préférable d'y installer un petit hangar contenant une chaudière pour la production de la vapeur et de petits accumulateurs d'air comprimé, en communication par la canalisation avec ceux de l'usine centrale. Ces accumulateurs alimentant tout d'abord la voiture ont pour avantage de diminuer la masse d'air qui devrait venir brusquement de l'usine centrale, au moment où les réservoirs de la voiture pourraient être presque vides. On diminue ainsi la perte de charge considérable du début. Une installation suivant cette disposition a été faite à Bry-sur-Marne sur les tramways Nogentais.

Avant de nous occuper des voitures, il est bon de dire quelques mots de l'installation générale des usines centrales.

Il y a toujours avantage à en diminuer le nombre autant que possible, puisque, avec cette disposition, on peut augmenter la puissance des unités produisant la compression ; l'air comprimé est obtenu à un prix moins élevé et le personnel est diminué, ainsi que les frais de premier établissement. Une usine centrale peut suffire pour un réseau dont le développement est de 20 km.

Quant à la disposition intérieure, elle est variable suivant la disposition des lieux ; mais il faudra toujours, autant que possible, mettre l'un près de l'autre le bâtiment des chaudières, celui des pompes de compression avec leurs machines à vapeur, ainsi que le hangar de chargement et l'atelier de réparation. La remise des

voitures pourra être séparée de ces divers bâtiments, et des vc intérieures raccorderont le hangar de chargement et la ren avec les voies extérieures du tramway.

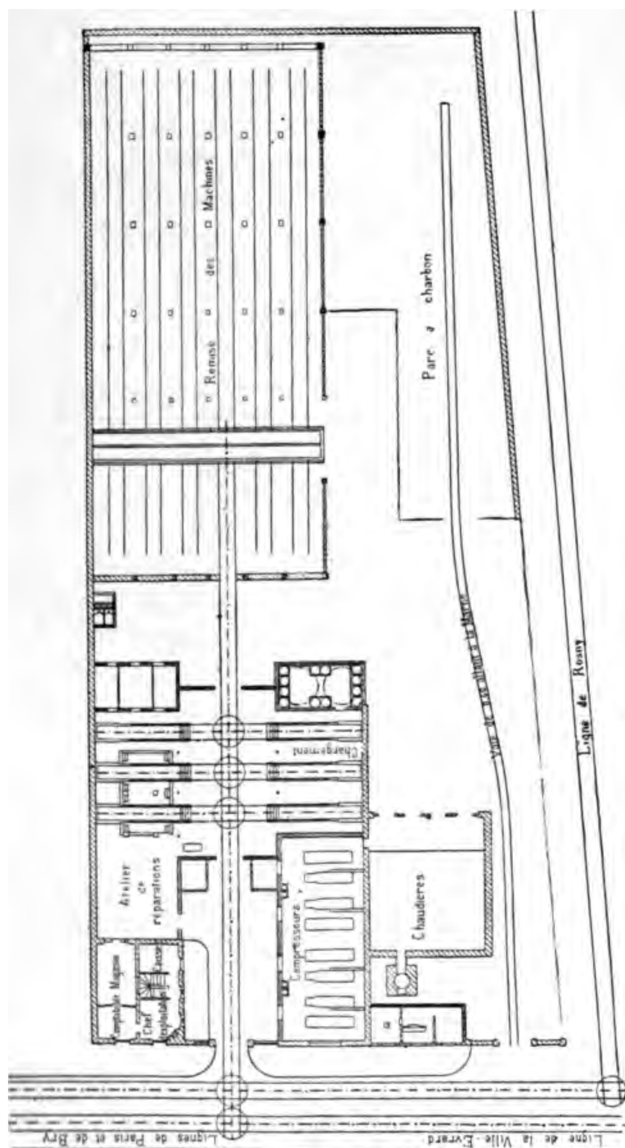


Fig. 42. — L'usine centrale de la Maltourné.

Nous donnons (fig. 42) le plan de l'usine centrale de la M tourné, des tramways Nogentais.

Appareil moteur. — L'air comprimé des accumulateurs de l'usine centrale est introduit, soit à cette usine, soit aux bouches de chargement situées sur la voie publique, dans des réservoirs installés *ad hoc* sur chaque véhicule ; il y est généralement emmagasiné à la même pression que dans les réservoirs de l'usine.

Le volume de ces réservoirs dépend du parcours que les voitures doivent faire, et, comme nous l'avons dit précédemment, il y a avantage à emmagasiner le poids d'air le plus considérable possible, sous le volume le plus faible, en employant les hautes pressions ; on augmentera ainsi le parcours sans renouvellement, et on diminuera les dépenses de traction.

Ces réservoirs sont placés sous la caisse de la voiture entre les longerons et transversalement à l'axe longitudinal. La figure 43

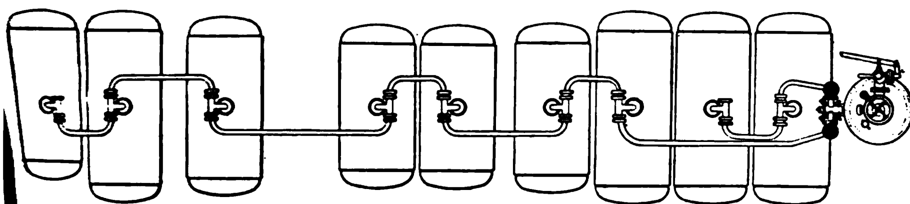


Fig. 43. — Réservoirs des voitures.

montre la disposition adoptée par la Compagnie générale des Omnibus pour ses automotrices. Comme on le voit, les neuf réservoirs sont disposés en deux sections ou batteries complètement séparées. La batterie d'arrière est composée de 7 éléments et sert pour la marche normale ; la batterie d'avant, composée de 2 éléments seulement, forme réserve et ne sert que dans les cas exceptionnels, soit de détresse, soit de rampes exagérées, ou lorsque, par suite de circonstances inattendues, la batterie d'arrière devient insuffisante. La figure montre la disposition de la tuyauterie de chacune de ces batteries.

Chaque élément de batterie est formé d'un cylindre en tôle d'acier de 0,60 m. de diamètre et de 1,20 m. à 1,50 m. de longueur. Ces cylindres sont en tôle emboutie et l'un des fonds forme un seul et même morceau avec la partie cylindrique.

L'autre fond est formé d'une tôle emboutie rivée sur le corps cylindrique. Pour une pression de 60 kg., comme sur la ligne de Saint-Augustin, l'épaisseur de la tôle est de 12 mm. et le travail par millimètre carré de 15 kg. L'acier employé doit résister à un effort de traction de 50 kg. par millimètre carré avant rupture, avec allongement de 23 p. 100.

On peut compter qu'avec ces réservoirs le poids de 1 kg. d'air comprimé correspond à un poids de 12 kg. de réservoir.

Nous avons donc de l'air, à pression élevée, emmagasiné dans les réservoirs de la voiture. Il s'agit maintenant d'obtenir avec cet air la force motrice nécessaire à la propulsion du véhicule, en le faisant détendre dans des cylindres où des pistons actionnent, par l'intermédiaire de bielles, les essieux de la voiture, comme dans une locomotive ordinaire.

Dans quelles conditions thermiques devra se faire cette détente de l'air, soit au point de vue pratique, soit au point de vue du rendement? C'est ce problème qui a arrêté, au début, les promoteurs de la traction par l'air comprimé, qui, tout en ayant trouvé un des éléments de la solution du problème, n'ont pu parvenir à la rendre pratique. Nous avons donc à examiner ce qui a été fait dans ce but, dans ces dernières années, et à indiquer la solution à laquelle on s'est définitivement arrêté.

Nous avons de l'air, dans les réservoirs de la voiture, à la température ambiante, que nous pouvons admettre de 12° C. Supposons que cet air se détende de la pression d'admission de 7 kg., qui est généralement celle admise dans la pratique, à la pression atmosphérique, et voyons ce que deviendront la température finale, après la détente, et le travail produit par cette détente, pour 1 kg. d'air, lorsque la température initiale variera de + 12 à 300°, en passant par les températures intermédiaires de 100 et de 200°. Il est évident que, dans ces conditions, la détente sera adiabatique, puisqu'il n'y a aucun réchauffement de l'air pendant cette détente.

Nous calculerons la température finale au moyen de la formule précédemment indiquée :

$$t_1 = t_0 \left(\frac{1}{7}\right)^{0,29};$$

et le travail dû à la détente par la formule :

$$\mathcal{T} = 102,69\ (t_0 - t_1).$$

Nous obtiendrons ainsi le tableau suivant :

	Détente de 7 à 1 kg.			
Température t_0	12°	100°	200°	300°
Température finale t_1	— 111°	— 60°	— 3°	+ 54°
Travail adiabatique .	12 669 kgm.	16 480 kgm.	20 909 kgm.	25 338 kgm.
Travail isothermique.	16 300 —	21 300 —	27 100 —	32 800 —

Nous voyons de suite que si nous prenons l'air à la température du réservoir, c'est-à-dire à 12°, et que nous le détendions, la température finale sera de — 111° ; à cette basse température l'eau contenue dans l'air se transformera en glace, viendra boucher toutes les ouvertures, lumières et purgeurs du cylindre, et arrêtera très vite la marche de la machine, en congelant en outre les huiles de graissage. C'est ce grave inconvénient qui a été, pendant longtemps, le principal obstacle au développement des moteurs à air comprimé.

Si nous augmentons, par un moyen quelconque, la température de l'air au moment où il va se détendre, la température finale s'élèvera, mais, chose aussi importante, le travail produit par le kilogramme d'air, pendant sa détente, augmentera également. Si nous supposons que ce travail est 1 pour la température de 12°, il deviendra 1,30 pour 100°, 1,65 pour 200° et 2,00 pour la température de 300° ; il aura donc doublé.

Le relèvement de la température de l'air, *avant la détente*, a donc pour premier avantage d'augmenter considérablement le travail produit par la détente de cet air, en diminuant également la température finale.

Cet avantage avait été reconnu, du reste, par Andraud et Tessié du Motay, puisqu'ils le préconisent dans leur mémoire.

Que va-t-il arriver si, en outre du réchauffement de l'air avant la détente, nous arrivons à maintenir ce réchauffement par un moyen quelconque, pendant toute la durée de cette détente ? Elle ne sera plus alors adiabatique, mais elle deviendra isothermique, et nous savons que, dans ce cas, le travail produit par la

détente d'un kilogramme d'air est plus grand que dans le premier cas.

Calculons donc ce travail par la formule :

$$\mathcal{T} = 29,28\,(273 + t^0)\ \text{log nép}\ 7\,;$$

nous obtiendrons les chiffres indiqués au tableau précédent. La détente isothermique augmente le travail dans le rapport de 1 à 1,29, en prenant pour unité le travail adiabatique. Nous obtenons donc, par ce réchauffage de l'air *pendant la détente*, une nouvelle augmentation de travail importante qui, combinée avec la première, donne les chiffres indiqués à la dernière ligne du tableau précédent.

Si, par exemple, l'air est élevé, *avant sa détente*, à la température de 100° et maintenu à cette même température pendant toute la durée de cette détente, le travail produit par un poids déterminé d'air sera 68 p. 100 plus grand que celui produit par ce même poids d'air à 12°, se détendant sans aucun réchauffement, soit avant, soit pendant la détente.

Nous pouvons donc conclure que, pour rendre possible et d'un usage pratique l'emploi de l'air comprimé comme force motrice, il faut élever à une certaine température l'air comprimé, *avant sa détente*, et maintenir cette augmentation de température *pendant toute la durée de la détente*. Ces deux conditions sont la base des machines motrices à air comprimé.

Comment arrive-t-on à ce résultat? M. Popp a proposé, pour son système de traction à basse pression, des poêles chauffés au coke, entourés de serpentins dans lesquels circule l'air des réservoirs avant son admission dans les cylindres moteurs.

Ces appareils sont encombrants et obligent à avoir sur le véhicule des foyers, ce qui est toujours dangereux; de plus ils réchauffent bien l'air avant la détente, mais le réchauffage pendant cette détente n'est pas prévu; ils ne donnent donc qu'une solution incomplète.

C'est à M. Mékarski qu'est due la solution pratique de cette question; elle est originale et en même temps très simple.

Un réservoir rempli d'eau chaude à la température de 165 à 180°

est placé sur le véhicule, et l'air, avant de se rendre au régulateur qui règle son admission dans les cylindres moteurs, est obligé de

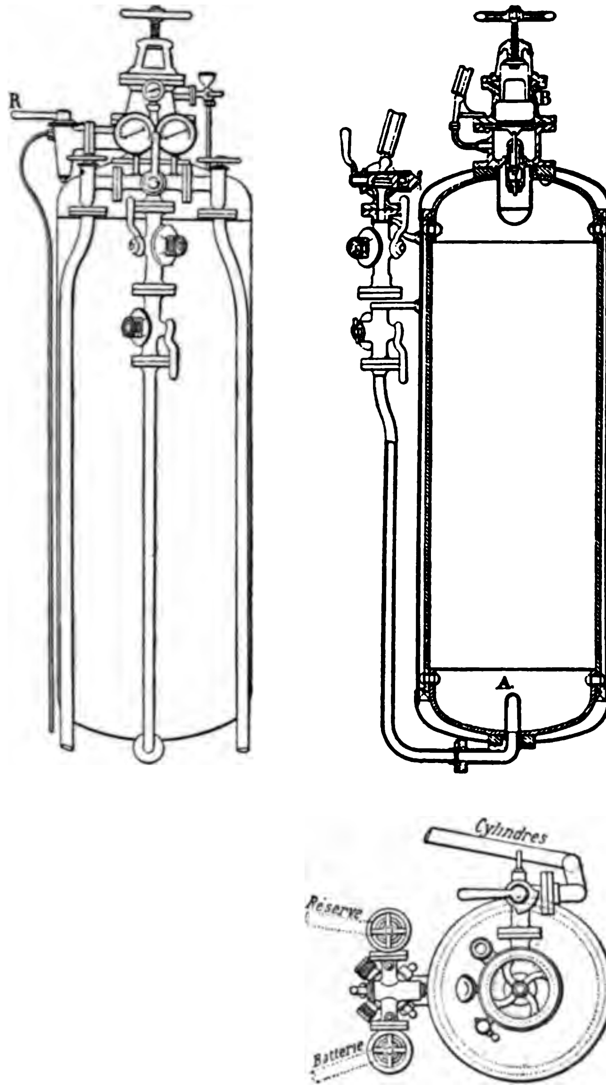


Fig. 44. — Bouillotte.

traverser cette masse d'eau chaude. Il s'échauffe et en même temps se sature de vapeur d'eau.

La première condition est donc remplie, puisque l'air est réchauffé entre 165° et 100°, *avant son admission dans les cylindres*.

Cet air chaud et saturé pénétrera dans les cylindres moteurs, mais, par suite de la détente, la température s'abaissera, l'eau de saturation se condensera et, par sa chaleur latente de vaporisation, élèvera la température de l'air en la maintenant presque uniforme pendant le travail de détente. Nous aurons donc une *détente isothermique* et la deuxième condition sera remplie.

La solution due à M. Mékarski est tout à fait pratique et nous allons en montrer l'application aux automotrices de la Compagnie générale des Omnibus.

La figure 44 représente la bouillotte (c'est le nom qu'on lui donne) étudiée par M. Mékarski. Elle se compose d'un cylindre en tôle d'acier de 0,50 m. de diamètre terminé par deux calottes. L'acier employé est le même que celui qui sert pour les réservoirs des véhicules. L'air, venant des réservoirs, pénètre dans cette bouillotte à sa partie inférieure en A. Des robinets indiqués sur la figure permettent d'en régler l'admission. L'air, après s'être échauffé et saturé en traversant la masse d'eau chaude contenue dans cette bouillotte, se réunit à la partie supérieure et est ensuite admis, à la volonté du mécanicien, dans les cylindres moteurs au moyen du régulateur-détendeur B, et du robinet de manœuvre R.

La figure 45 représente ce détendeur. Il est fondé sur le même principe que le robinet du déverseur dont nous avons parlé précédemment.

L'air, saturé de vapeur d'eau, pour passer de la bouillotte A dans le réservoir O et, de là, aux cylindres moteurs, doit traverser la soupape d'introduction S maintenue fermée par un ressort et par la pression existant dans la bouillotte ; cette soupape est munie d'une tige *b* s'appuyant sur un plateau P qui s'appuie lui-même sur un disque en caoutchouc fixe, *a*. A la partie supérieure le réservoir H, rempli d'eau, est surmonté d'une cloche K pleine d'air. Par la manœuvre de la vis M, au moyen du volant N, on peut abaisser ou relever la cloche K, et par suite faire varier la pression dans le système K H qui forme presse hydraulique. Comme le fond du réservoir H est percé de trous, toute variation de pres sion produite dans la presse hydraulique sera transmise au dia-

phragme *a*, au plateau P, et par suite à la soupape S d'introduction d'air. On obtiendra ainsi une élasticité très grande et le mécanicien pourra, sans difficulté, fixer à sa volonté la pression d'admission de l'air dans les cylindres et la faire varier, suivant la charge et le profil de la ligne.

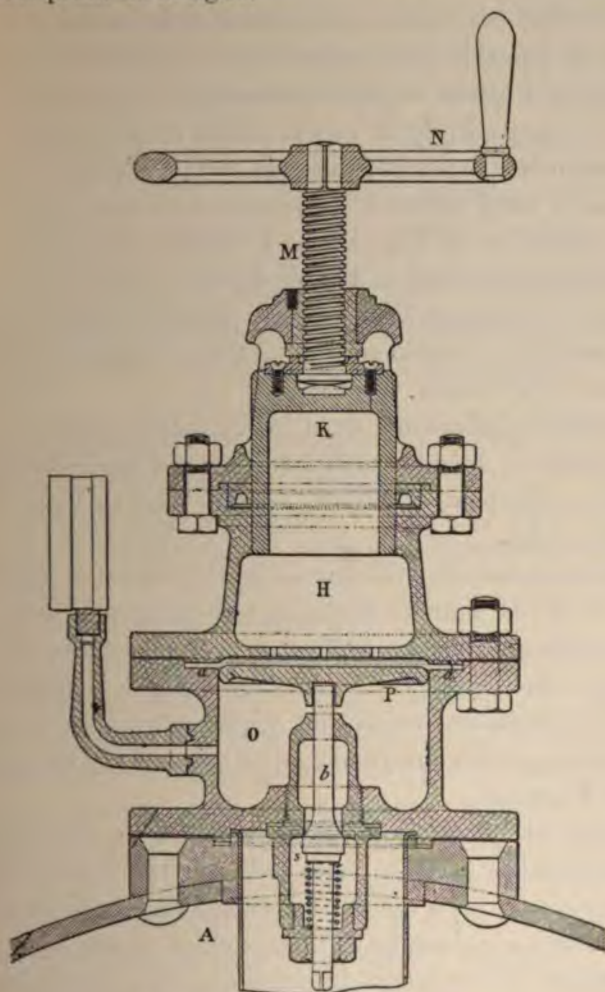


Fig. 45. — Régulateur-détendeur.

Ce régulateur de pression est très simple et donne en service d'excellents résultats.

En pratique, on admet que le poids de vapeur à introduire dans

la bouillotte et nécessaire pour compenser par sa condensation le travail dû à la détente de un kilogramme d'air dans les cylindres avec une pression d'admission de 7 kg., est de 6 p. 100 avec un rapport de pression entre la vapeur et l'air du réservoir de 0,14 environ.

On introduit donc dans la bouillotte de la vapeur à la pression de 7 kg. et, par suite, à la température de 165°. Lorsque l'air du réservoir sera épuisé et que la pression dans celui-ci sera réduite à 7 kg., la pression de la vapeur devra encore être de 1 kg. et, par conséquent, sa température de 100°. Entre les deux limites extrêmes, la température de la vapeur d'eau aura varié de 165° à 100° et sa pression de 7 kg. à 1 kg. C'est également avec ces mêmes températures que se fera la détente dans les cylindres.

Quant au volume de la bouillotte, on le calculera en se basant sur les indications précédentes et en tenant compte du volume des réservoirs de la voiture.

La pression d'admission dans les cylindres moteurs varie suivant le profil, et, dans le cas de fortes rampes ou de charges exceptionnelles, elle peut atteindre, comme sur la ligne de Saint-Augustin, 15 kg.

L'admission dans les cylindres est généralement de 25 à 30 p. 100; c'est celle de la marche ordinaire ; ce n'est que dans des cas exceptionnels qu'elle est modifiée ; on préfère, comme nous venons de le dire, obtenir les variations d'effort par le changement de la pression d'admission, en faisant varier celle-ci en dessus ou en dessous de la pression moyenne, qu'on admet de 10 kg. sur la ligne de Saint-Augustin.

Il est un cas, toutefois, où la modification du cran d'admission est avantageuse ; c'est celui où les rails sont très humides et où, par suite, le patinage est à craindre. En augmentant de quelques centièmes l'admission dans les cylindres et en réduisant la pression d'introduction, la variation du couple moteur est diminuée et le patinage moins à redouter.

Nous introduisons donc dans les cylindres moteurs de l'air saturé de vapeur d'eau, à une température qui, comme nous l'avons dit, variera entre 165 et 100°; cherchons quel est le travail que produira, dans ces conditions, un kilogramme d'air se détendant

dans les cylindres, avec une admission de 30 p. 100 et des pressions initiales variant de 7 à 15 kg.

M. de Marchéna, dans son mémoire sur la traction mécanique des tramways, a calculé ce travail, en admettant une température constante de la vapeur, pendant la détente, de 100°, une admission de 30 p. 100, une détente de 2,5 (sans tenir compte des espaces morts qui sont de 7 p. 100) et une contre-pression de 1,20 kg. Il a obtenu les résultat suivants, en prenant les 0,90 du travail théorique :

Pression d'admission.	Travail de 1 kg. d'air.
7 kg.	15 615 kgm.
10 —	16 470 —
15 —	16 830 —

Il ressort de l'examen de ce tableau que le travail produit par le kilogramme d'air varie dans de très faibles limites avec l'augmentation de la pression d'admission; c'est un fait important à constater.

Ces chiffres ne donnent qu'un rendement de 25 p. 100 environ entre le travail *indiqué* dans les cylindres moteurs et le travail des compresseurs, et de 17 p. 100 entre le travail à la jante et le travail indiqué dans les cylindres de la machine à vapeur actionnant les compresseurs.

Ces résultats ont été très critiqués.

Dans les discussions nombreuses qui ont suivi la publication du travail de M. de Marchéna, on trouve, pour différentes lignes de tramways à air comprimé, la constatation, certainement exacte, de la quantité d'*air* consommé en moyenne par kilomètre-voiture ; étant donné ce résultat déjà important, pour connaître le travail du kilogramme d'air, il serait indispensable d'avoir le poids exact du véhicule ayant servi aux expériences ainsi que la résistance moyenne à la traction appliquée sur la ligne considérée. Or malheureusement, ces deux renseignements manquent, ou tout au moins l'un d'eux, de sorte qu'il est bien difficile d'en tirer des conclusions certaines.

Dans la réponse faite par M. de Marchéna aux observations de M. Badois [1], nous trouvons un renseignement qui peut permettre

[1] *Bulletin de la Société des ingénieurs civils.* (Numéro de janvier 1895.)

quelques éclaircissements. C'est un tableau donnant le relevé exact de la dépense d'air d'une automotrice seule, faisant le parcours, aller et retour, de Saint-Augustin au Cours de Vincennes. D'un autre côté, nous trouvons dans la discussion qui a eu lieu à la Société Internationale des Électriciens, le 6 janvier 1897, que M. Mékarski attribue à la résistance moyenne de la ligne « Saint-Augustin-Cours de Vincennes » le chiffre de 17 kg. ; cette résistance doit être celle à la jante.

La dépense d'air constatée par M. de Marchéna est de 15,3 kg. par kilomètre-voiture. Rapprochons ces deux chiffres. Le poids de la voiture étant de de 14 t. (nous admettons que le nombre des places occupées est, en moyenne, les 2/3 du nombre des places offertes), le travail par kilomètre sera de :

$$17 \times 14 \times 1\,000 = 238\,000 \text{ kgm.};$$

ce qui donne un travail à la jante, par kilogramme d'air, de :

$$\frac{238\,000}{15,3} = 15\,555 \text{ kgm.};$$

et dans le cylindre moteur, avec un rendement de 0,80, un travail de :

$$\frac{15\,555}{0,80} = 19\,068 \text{ kgm.}$$

Le kilogramme d'air produirait donc, dans ce cas, 19 000 kgm. au lieu de 16 000, chiffre indiqué comme moyenne par M. de Marchéna. Le chiffre de 19 000 se rapproche, du reste, de celui donné par M. Barbet dans son mémoire.

La consommation de 15,3 kg. d'air par kilomètre-voiture, obtenue par M. de Marchéna, est le résultat d'une seule expérience faite entre Saint-Augustin et Vincennes ; elle peut fort bien ne pas correspondre à la consommation moyenne résultant d'une exploitation régulière de plusieurs mois.

Nous avons enfin un dernier renseignement qui peut permettre de trouver un résultat sinon complètement exact, au moins se rapprochant très près de la vérité. C'est le poids d'air alloué par kilomètre-voiture par la Compagnie générale des Omnibus à ses mécaniciens, sur la ligne de Saint-Augustin. Cette quantité est

de 14,5 kg. avec prime d'économie ; la moyenne de ces économies est, paraît-il, d'environ 25 p. 100, ce qui porterait la dépense par kilomètre-voiture à 10,87 kg. Admettons cependant que cette dépense moyenne n'atteigne pas un chiffre aussi bas, et supposons-la de 13 kg.

Le travail à la jante par kilogramme d'air sera de :

$$\frac{238\,000}{13} = 18\,308 \text{ kgm.};$$

et dans le cylindre moteur, avec un rendement de 0,80, de :

$$\frac{18\,308}{0{,}80} = 22\,885 \text{ kgm.}$$

C'est ce chiffre que nous adopterons comme base de nos calculs.

En résumé, nous aurons comme répartition du travail par kilogramme d'air, entre les cylindres de la machine à vapeur de l'usine centrale, les compresseurs, les cylindres moteurs du véhicule et la jante, les chiffres suivants, pour les différentes pressions de l'air comprimé :

PRESSION dans les réservoirs	TRAVAIL dans la machine à vapeur	TRAVAIL dans le compresseur	TRAVAIL dans les cylindres moteurs	TRAVAIL à la jante avec 0,80 de rendement.
Kg.	Kgm.	Kgm.	Kgm.	Kgm.
30	53 900	45 857	22 885	18 308
50	62 000	52 857	22 885	18 308
60	70 000	59 539	22 885	18 308
80	75 000	63 846	22 885	18 308

correspondant à un rendement pour les différentes pressions de :

PRESSIONS	Entre le compresseur et le cylindre moteur.	Entre le compresseur et la jante.	Entre la machine à vapeur et la jante.
Kg.	P. 100	P. 100	P. 100
30	49	40	34
50	43	35	30
60	39	31	26
80	36	29	24

On voit par ce tableau l'avantage qu'il y aurait à employer des pressions modérées dans les réservoirs ; si, à côté de cela, on n'avait pas l'inconvénient, beaucoup plus grave, comme nous l'avons dit, de renouvellements d'air trop fréquents et de l'augmentation, dans une forte proportion, des dépenses de traction.

Le tableau précédent nous permet de déterminer le poids d'air nécessaire pour produire 1 cheval-vapeur dans les cylindres de la machine motrice du véhicule. Ce poids sera :

$$\frac{270\,000}{22\,885} = 11{,}80 \text{ kg.}$$

Nous donnons sur la figure 46 la disposition adoptée pour le moteur des automotrices de la ligne de Saint-Augustin. On a placé les cylindres à l'arrière des voitures pour la répartition du poids et

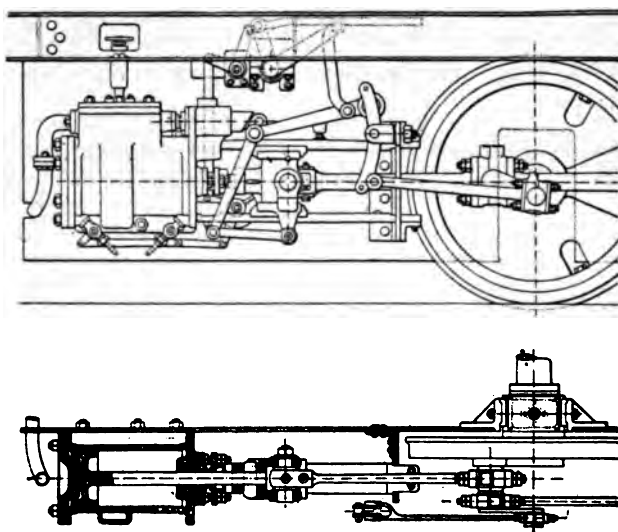


Fig. 46. — Appareil moteur.

extérieurement aux longerons ; la distribution se fait au moyen de la coulisse Walschaërt. Les cylindres ont un diamètre de 0,19 m. et une course de 0,26 m. Les deux essieux sont accouplés et les roues motrices ont un diamètre de 0,75 m.

Le mécanicien a à sa disposition, à côté de la bouillotte, le

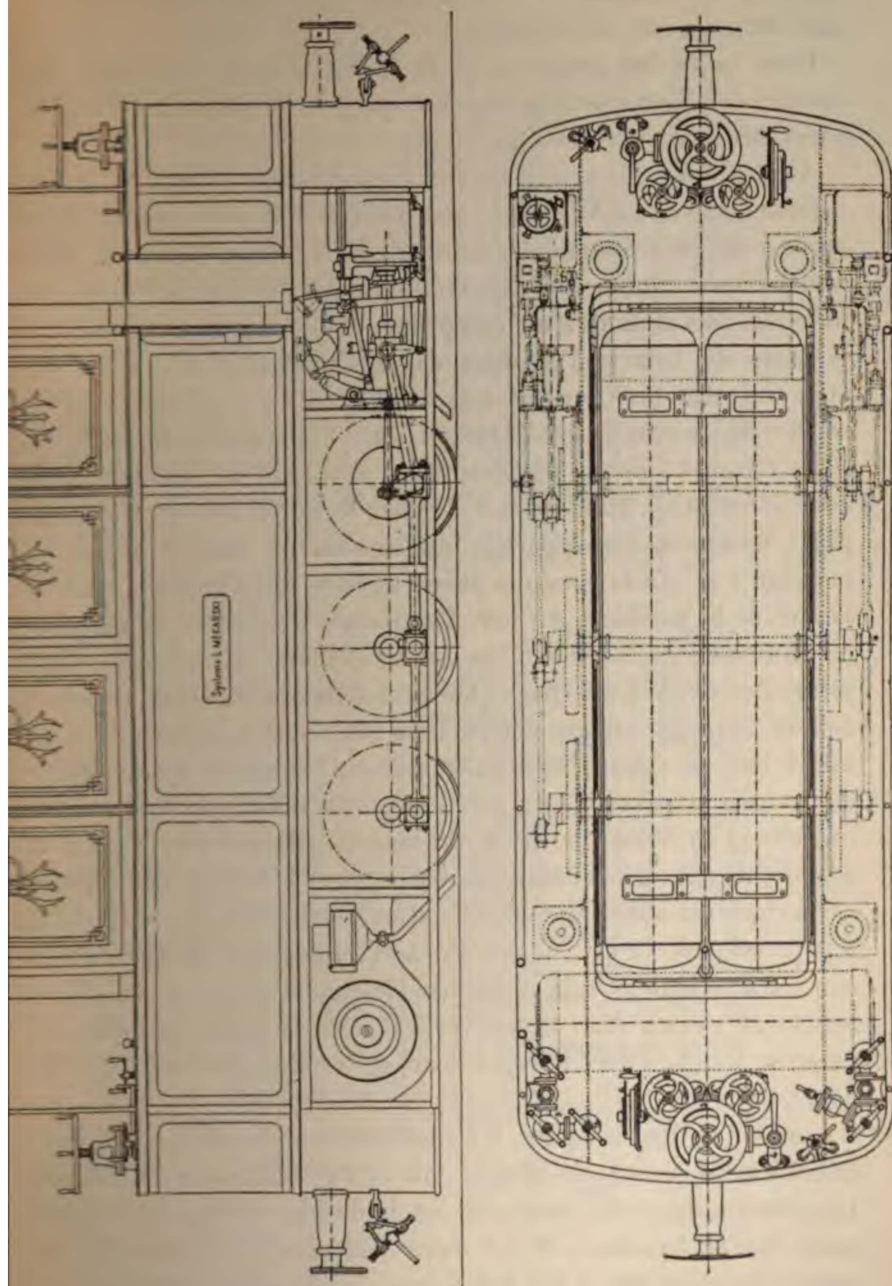


Fig. 47. — Locomotive à air comprimé.

levier de changement de marche ainsi qu'un autre levier actionnant les purgeurs des cylindres.

Pour éviter les accidents et la boue, tout le mécanisme est entouré de plaques de tôle mobiles, qui peuvent être relevées pour permettre la visite et les réparations.

Avant de décrire succinctement l'automotrice en service sur le tramway de Saint-Augustin, que nous avons pris comme type, et de nous rendre compte du travail qu'elle exige dans les différentes circonstances de l'exploitation, nous devons dire quelques mots des locomotives à air comprimé, étudiées pour le service de la ligne de Louvre-Versailles de la Compagnie générale des Omnibus. Un type entièrement semblable a été adopté pour le service du chemin de fer d'Arpajon, dans l'intérieur de Paris.

La figure 47 donne en plan et en élévation la disposition de cette locomotive. Dans le but d'éviter le retournement à chaque point terminus, les appareils de manœuvre sont doubles, de manière à ce que la conduite puisse se faire soit d'un côté, soit de l'autre de la machine. Au lieu d'une seule bouillotte, comme sur les automotrices, le réchauffage de l'air s'obtient au moyen de deux réservoirs d'eau chaude placés horizontalement sous la plate-forme, comme l'indique la figure. Ces deux réservoirs sont complémentaires l'un de l'autre, le dernier servant lorsque la température du premier a baissé. Ces réservoirs sont d'ailleurs de dimensions inégales, l'un d'eux, de 175 l. de capacité, devant servir pour la batterie de réserve, et l'autre, de 300 l., pour la batterie principale.

La vapeur destinée au réchauffage est admise dans ces réservoirs à la pression de 12 kg., c'est-à-dire à la température de 190°. Chacun communique avec le régulateur-détendeur placé sur la plateforme, au moyen d'un tuyau vertical dont la partie supérieure, avant sa jonction avec le régulateur, se termine par une sorte de dôme.

Comme l'indique la figure, il y a huit réservoirs d'air placés longitudinalement, quatre de chaque côté et l'un au-dessus de l'autre. La pression dans ces réservoirs est de 80 kg. et l'approvisionnement de 530 kg. d'air. Il est donc emmagasiné un travail à la jante représenté par 9 703 240 kgm., en prenant les chiffres que nous avons admis.

Cette locomotive repose sur trois essieux accouplés. Les cylindres moteurs sont extérieurs aux longerons et la distribution est du système Walschaërt. Elle pèse à vide 16 500 kg., et en service 18 000 kg., également répartis sur les trois essieux.

Revenons maintenant à l'automotrice que nous avons prise comme type, c'est-à-dire celle des tramways de Saint-Augustin au Cours de Vincennes. La figure 48 en donne l'élévation. Elle repose sur deux essieux avec un assez fort porte à faux à l'avant et à l'arrière, par suite de la nécessité dans laquelle on s'est trouvé de limiter l'espacement des essieux pour le passage dans les courbes de petit rayon. Aux vitesses dépassant 14 ou 15 km., elle subit de ce fait un certain mouvement de tangage; il est juste de dire que ces vitesses sont rarement atteintes.

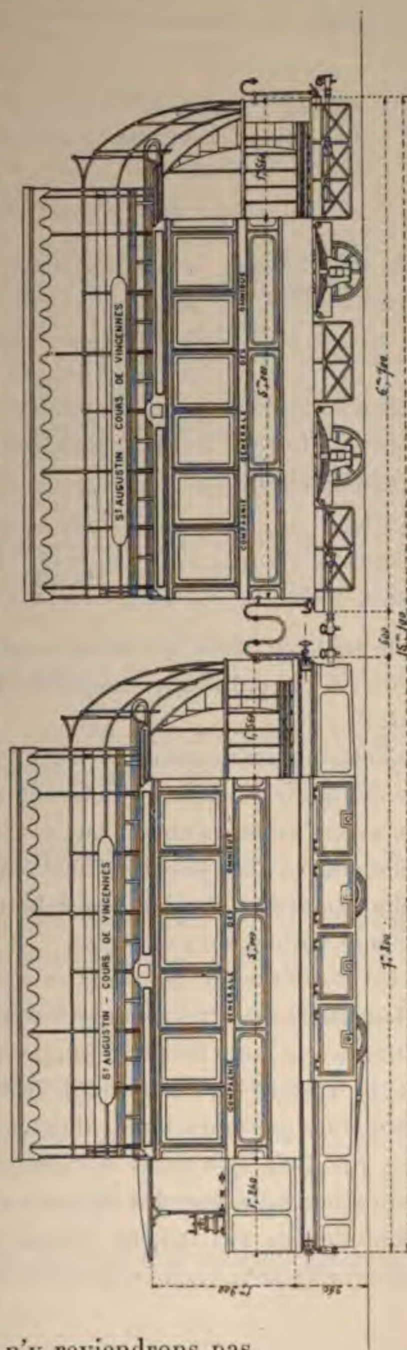


Fig. 48. — Automotrice et voiture du tramway de Saint-Augustin-Cours de Vincennes.

La caisse n'offre rien de particulier; elle est à impériale couverte à 50 places (20 places d'intérieur, 6 places de plate-forme et 24 places d'impériale). Quant à la partie mécanique, nous n'y reviendrons pas.

Le poids de l'automotrice peut se décomposer comme il suit :

Caisse	2 000 kg.
Réservoirs et bouillotte	4 000
Châssis et mécanisme	5 500
Total à vide	11 500 kg.
Air et eau	380
50 voyageurs à 70 kg	3 500
Total en charge	15 380 kg.

Les réservoirs d'air ont un volume de 2,50 m³ dont 0,750 m³ pour la batterie de réserve. A la pression de 60 kg., cela correspond à un poids d'air de :

$$\left(60 \times 1\,293 \times \frac{1}{1 + \frac{12}{273}}\right) 2\,50 = 186{,}19 \text{ kg.}$$

Une sablière, dont la trémie est placée sous les banquettes, permet d'éviter le patinage, lorsque les rails sont très humides et glissants.

Examinons maintenant le travail que nécessite la traction de cette automotrice, dans les différentes conditions d'exploitation que nous avons prises comme base, et cherchons quel sera le parcours qu'elle pourra faire sans renouvellement d'air, ainsi que la dépense qu'elle exigera en charbon par kilomètre-voiture, toute seule, puis avec une voiture de remorque.

Il est bien entendu que dans ce cas, comme pour tous les autres systèmes examinés, nous admettrons une résistance totale moyenne par tonne à la jante de 17,50 kg. pour l'automotrice et de 12,50 kg. pour la voiture de remorque. (Ces chiffres s'appliquent, bien entendu, au parcours total, aller et retour.)

Les résultats que nous obtiendrons ne s'appliqueraient donc pas directement à une des lignes où elles circulent actuellement; nous ne l'avons pas fait, ne connaissant pas d'une manière suffisamment exacte le coefficient de résistance qu'il eût fallu prendre

TRAVAIL MOYEN ET DÉPENSE DE CHARBON PAR KILOMÈTRE-VOITURE

1° *Automotrice seule.*

En nous reportant aux renseignements qui ont été donnés plus haut sur l'automotrice, et en prenant les mêmes bases de résistance moyenne que nous avons adoptées dans les cas précédents, nous aurons comme travail kilométrique :

$$14 \times 17,5 \times 1\,000 = 245\,000 \text{ kgm.}$$

En prenant le chiffre que nous avons admis de 18308 kgm. pour le travail du kilogramme d'air à la jante, et 0,80 comme coefficient de rendement du moteur, nous aurons, comme poids d'air dépensé par kilomètre-voiture dans les cylindres moteurs :

$$\frac{245\,000}{0,80 \times 22\,885} = 13,37 \text{ kg}$$

Un cheval indiqué dans les cylindres de la machine à vapeur de compression, produisant, à la pression de 60 kg., 3,86 kg. d'air, il nous faudra :

$$\frac{13,37}{3,86} = 3,45 \text{ ch. par kil. voit.}$$

Nous pouvons admettre une consommation de charbon de 1,25 kg. par cheval ; la consommation totale sera donc de :

$$3,45 \text{ chev.} \times 1,25 \text{ kg.} = 4,31 \text{ kg. de charbon par kil. voit.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

En suivant la même méthode, nous aurons pour le travail kilométrique :

$$245\,000 + 12,5 \times 9 \times 1\,000 = 357\,500 \text{ kgm.};$$

et comme dépense d'air dans les cylindres moteurs par kilomètre-voiture.

$$\frac{357\,500}{0,80 \times 22\,885} = 19,54 \text{ kg.}$$

Le nombre de chevaux à produire par kilomètre-voiture dans les cylindres de la machine fixe de compression, sera :

$$\frac{19,54}{3,86} = 5,06 \text{ chev.}$$

et la consommation kilométrique de charbon sera :

$$5,06 \text{ chev.} \times 1,25 \text{ kg.} = 6,33 \text{ kg.}$$

TRAVAIL MOYEN A LA VITESSE DE 12 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule :*

La résistance moyenne sera :

$$14 \times 17,50 = 245 \text{ kg.};$$

et le travail par seconde :

$$\frac{245 \times 3,33}{75} = 10,90 \text{ chev. à la jante.}$$

Dans les cylindres moteurs, la résistance deviendra :

$$\frac{245}{0,80} = 307 \text{ kg.};$$

et nous obtiendrons la pression nécessaire avec une admission de 30 p. 100, au moyen de la formule :

$$p = \frac{P.D}{m \times d^2 l};$$

dans laquelle :

P = effort à produire = 307 kg.
D = diamètre des roues = 0,75 m.
m = coefficient de réduction dû à la détente = 0, 55
d = diamètre des cylindres = 0,19 m.
l = course des pistons = 0,26 m.

d'où :

$$p = \frac{307 \times 75}{0,55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 4,76 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

La résistance dans le cylindre sera :

$$\frac{17,5 \times 14 + 12,5 \times 9}{0,80} = 447 \text{ kg};$$

et le travail en chevaux de :

$$\frac{447 \times 3,33}{75} = 19,80 \text{ chev.}$$

La pression d'admission dans le cylindre deviendra :

$$p = \frac{447 \times 75}{0,55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 6,93 \text{ kg.}$$

TRAVAIL SUR UNE RAMPE DE 50 MILLIMÈTRES
AVEC UNE VITESSE DE 5 KILOMÈTRES A L'HEURE

I. — SANS TENIR COMPTE DU DÉMARRAGE

1° *Automotrice seule.*

Résistance dans le cylindre :

$$\frac{(13,50 + 50)\ 14}{0,80} = 1\,110 \text{ kg.}$$

Travail en chevaux :

$$\frac{1\,110 \times 1,39}{75} = 20,50 \text{ chev.}$$

Pression d'admission dans le cylindre moteur :

$$p = \frac{1\,110 \times 75}{0,55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 17,22 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

Résistance dans le cylindre :

$$\frac{(13,50 + 50)\ 14 + (8,50 + 50)\ 9}{0,80} = 1\,769,4 \text{ kg.}$$

Travail en chevaux :

$$\frac{1\,769 \times 1{,}39}{75} = 32{,}75 \text{ chev.}$$

Pression d'admission dans le cylindre :

$$p = \frac{1\,769 \times 75}{0{,}55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 27{,}46 \text{ kg.}$$

II. — En tenant compte du démarrage, ou la vitesse de 5 kilomètres a l'heure devra être obtenue en 5 secondes

1° *Automotrice seule.*

Résistance totale pendant la dernière seconde, à la jante :

$$51 \frac{\overline{1{,}39}^2}{5^2} \frac{(5^2 - 4^2)\,14}{1{,}25} + (13{,}5 + 50)\,14 = 1\,280 \text{ kg.}$$

Résistance dans le cylindre :

$$\frac{1\,280}{0{,}80} = 1\,600 \text{ kg.}$$

Pression d'admission dans les cylindres moteurs, avec introduction de 30 p. 100.

$$p = \frac{1\,600 \times 75}{0{,}55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 24{,}83 \text{ kg.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

Résistance totale pendant la dernière seconde, à la jante :

$$\frac{51}{1{,}25} \times \frac{\overline{1{,}39}^2}{5^2} (5^2 - 4^2)(14 + 9) + (13{,}5 + 50)\,14 + (8{,}50 + 50)\,9 = 2075 \text{ kg.}$$

Résistance dans les cylindres :

$$\frac{2\,075}{0{,}80} = 2\,600 \text{ kg.}$$

Pression d'admission dans les cylindres moteurs, avec introduction de 30 p. 100 :

$$p = \frac{2\,600 \times 75}{0{,}55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 40{,}35 \text{ kg.}$$

A la fin du voyage, il faudrait avoir recours, dans ces cas exceptionnels, à la batterie de réserve[1].

PARCOURS MAXIMUM QUI POURRA ÊTRE OBTENU AVEC CES AUTOMOTRICES

1° *Automotrice seule.*

L'approvisionnement d'air à 60 kg. est de 186 kg., mais comme il est de règle de rentrer à l'usine avec une pression de 10 kg. on ne peut compter que sur l'emploi de 160 kg. d'air[2]. Un kilogramme d'air produisant à la jante 18308 kgm., le nombre de kilogrammètres emmagasinés sera de :

$$160 \times 18\,308 = 2\,929\,280 \text{ kgm.}$$

[1] Dans le cas d'une voiture automotrice remorquant une seconde voiture, sur une rampe de 30 mm. à la vitesse de 12 km. à l'heure, cas du tramway de Saint-Augustin-Cours de Vincennes, nous aurions :

Effort dans les cylindres :

$$\frac{(13,50 + 30)\,14 + (8,50 + 30)\,9}{0,80} = 1\,194,4 \text{ kg.}$$

Travail en chevaux :

$$\frac{1\,194,4 \times 3,33}{75} = 53,04 \text{ chev.}$$

La pression d'admission dans les cylindres serait donc, avec une introduction de 30 p. 100 de :

$$\frac{1\,194,4 \times 75}{0,55 \times \overline{19}^2 \times 26} = 17,35 \text{ kg.}$$

Pour obtenir le démarrage de cette voiture et ne pas dépasser une pression d'admission de 16 kg., il faudra prendre une introduction de 65 à 70 p. 100 et une durée de démarrage de 30″. Nous aurons comme effort à produire dans les cylindres :

$$1\,000\,\frac{(14 + 9) \times 3,33}{9,80 \times 30 \times 0,80} + 1\,194 = 1\,519 \text{ kg.}$$

La pression d'admission avec 70 p. 100 d'introduction sera :

$$\frac{1\,519 \times 75}{0,80 \times \overline{19}^2 \times 26} = 16 \text{ kg.}$$

Le travail dans les cylindres sera :

$$\frac{1\,519 \times 3,33}{75} = 66,80 \text{ chev.}$$

[2] $\left(60 \times 1,293 \times \frac{1}{1 + \frac{12}{273}} - 10 \times 1,293 \times \frac{1}{1 + \frac{12}{273}}\right) 2,50 = 155,16$ kg. soit 160 kg.

en supposant que la température de l'air dans les réservoirs est de 12°.

Le travail à produire par kilomètre étant de 245 000 kgm.·. le nombre de kilomètres que pourra parcourir l'automotrice, sans renouvellement, sera de :

$$\frac{2\,929\,280}{245\,000} = 11{,}96 \text{ km},$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

Travail à produire par kilomètre :

$$245\,000 + 12{,}5 \times 9 \times 1\,000 = 357\,500 \text{ km}.$$

Le nombre de kilomètres que pourra parcourir la voiture, sans renouvellement, sera de :

$$\frac{2\,929\,280}{357\,500} = 8{,}19 \text{ km}.$$

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Cette dépense peut être établie en se basant sur :

1° La consommation d'air par kilomètre-voiture et le prix de revient de cet air. Le prix de revient de la tonne d'air comprimé à 60 kg., varie entre 20 et 25 francs, soit 22 fr. 50 en moyenne. Ce prix s'applique à Paris et comprend le combustible, l'eau, le graissage, le personnel et la main-d'œuvre, ainsi que les pertes dans la canalisation, la main-d'œuvre de chargement, le réchauffage de l'air, et enfin l'amortissement du capital d'installation à 10 p. 100.

En supposant un trafic de 1 000 000 de kilomètres par an, la dépense de premier établissement de l'usine centrale pourrait s'élever à environ 600 000 fr.[1], soit, par kilomètre-voiture,

[1]

Générateurs, moteurs à vapeur, tuyauterie, réservoirs, pompes, etc.	200 000 fr.
Cheminée et accessoires de fumisterie	90 000 —
Compresseurs, installation spéciale des accumulateurs.	110 000 —
Bâtiments des dépôts, remises, ateliers et outillage	200 000 —
Total	600 000 fr.

$\frac{600\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0$ fr. 06. Nous avons admis (v. p. 123 et 129) une dépense d'air de 13 kg. par kilomètre-voiture; cela représentera, par tonne d'air, un amortissement de $\frac{0,06 \times 1\,000}{13} =$ 4 fr. 60. Le prix de la tonne d'air sera donc de 22 fr. 50 — 4 fr. 60 = 17 fr. 90, soit 18 francs en chiffres ronds.

2° La dépense d'entretien et de réparation du matériel roulant, moteurs, ateliers, personnel des ateliers et matières premières. Cette dépense peut être supposée la même que celle que nous avons admise pour les voitures Rowan et Serpollet, car si nous n'avons plus l'entretien de la chaudière, il y a lieu de tenir compte de l'entretien des réservoirs d'air des voitures, de l'appareil de réchauffage de l'air et du régulateur.

Il convient de remarquer que ces dépenses d'entretien sont celles qui résultent d'un service de plusieurs années, et qu'elles seront, par conséquent, supérieures à celles du début de l'exploitation où le matériel est neuf et en parfait état.

La dépense par kilomètre-voiture s'établira donc comme il suit :

Dépense d'air comprimé (voir p. 129) 13 à 0,018 fr.	0,234 fr.
Entretien du matériel roulant, moteurs, graissage	0,110 —
Salaire des mécaniciens	0,080 —
Dépense de traction par kilomètre-voiture	0,424 fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il faut ajouter les dépenses dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction, qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 kilomètres, ayant 30 voitures, dont 20 en service parcourant chacune 150 kilomètres par jour, peut s'établir comme il suit :

Générateurs, moteurs à vapeur, tuyauterie, pompes, cheminée	290 000 fr.
Compresseurs, accessoires et accumulateurs	110 000 —
Bâtiments des dépôts, ateliers et outillage	200 000 —
30 voitures à 30 000 francs	900 000 —
Total	1 500 000 fr.

Ce qui représente, pour un parcours annuel de 1 000 000 de kilomètres, une dépense de :

$$\frac{1\,500\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0,15 \text{ fr.}$$

La dépense totale de traction par kilomètre-voiture s'élèvera donc à 0,424 + 0,150 = 0,574.

TRACTION ÉLECTRIQUE

PAR ACCUMULATEURS

Dans ce système, on dispose dans chaque voiture une batterie d'accumulateurs suffisante pour pouvoir effectuer un parcours déterminé. Cette énergie électrique, emmagasinée, est ensuite employée à produire la force motrice nécessaire à la propulsion de la voiture, en la faisant agir sur des dynamos réceptrices actionnant les roues des véhicules, soit directement, soit plus généralement au moyen d'engrenages ou de chaînes Galle. Cette force motrice qui doit faire mouvoir la voiture étant variable et dépendant du tracé et du profil de la ligne, on met à la disposition du conducteur un appareil, appelé « coupleur »[1], qui lui permet de dépenser cette énergie suivant le travail à produire.

Avant que l'énergie emmagasinée dans la batterie soit épuisée, la voiture revient à l'usine centrale pour y renouveler cette énergie, soit en remplaçant la batterie épuisée par une autre qui a été chargée à l'avance, soit en la rechargeant directement.

Ce système de traction, qui donne une indépendance absolue aux voitures et qui n'exige pour son application aucune modification de la voie, est certainement très séduisant et offre de grands avantages. Les progrès faits depuis quelques années permettent d'espérer que ce mode de traction recevra d'ici peu de nombreuses applications.

Les premiers essais de traction par accumulateurs sont déjà anciens ; ils datent de 1881, époque à laquelle M. Raffard appliqua

[1] Contrôleur, commutateur, régulateur.

à Paris des accumulateurs Faure à une voiture qui circula pendant quelque temps. Ces expériences furent renouvelées de 1883 à 1886, à Berlin et à Hambourg avec des accumulateurs du système Reckenzaum, et de 1887 à 1890, à Bruxelles et à Dresde avec des batteries du type Jullien. Enfin, en 1890, un nouvel essai fut fait à Paris avec des accumulateurs Phillippart, sur le boulevard Malesherbes. Ces différents essais furent peu satisfaisants et durent être abandonnés.

C'est alors que nous voyons apparaître en Angleterre sur la ligne de Birmingham, en 1890, en Amérique sur la ligne de Mount Vernon à New-York, en 1893, et à Paris également en 1893, sur les lignes de l'Opéra à Saint-Denis, les premières applications vraiment pratiques de la traction par accumulateurs.

Nous décrirons plus loin l'installation de la ligne de l'Opéra à Saint-Denis, en parlant de la méthode de *récupération* imaginée par Reynier, qui a publié, il y a plus de dix ans[1], tout ce qui est relatif à cette méthode, qu'on vient d'appliquer sur la ligne en question, et qui consiste à restituer dans la batterie, pendant la descente de certaines pentes fortes, une partie de l'énergie dépensée sur les rampes. Il y a évidemment là un avantage très sensible que les essais entrepris au chemin de fer du Nord, en juin 1893, ont fait nettement ressortir.

Une des applications les plus récentes, et en même temps des plus intéressantes (1897), du système de traction par accumulateurs, est celle qui vient d'être faite sur les lignes de tramways de Madeleine-Courbevoie-Bineau-Levallois et de Neuilly-Avenue du Roule, appartenant à la Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine.

Dans cette nouvelle exploitation, la traction s'opère au moyen d'accumulateurs Tudor, dits à charge rapide, où le renouvellement de l'énergie se fait directement dans la batterie et dans un temps très court, à des points déterminés du réseau, reliés au moyen de feeders, à une usine centrale.

Nous aurons à parler de cette installation et nous examinerons aussi le système mixte de traction par accumulateurs et trolley,

1. Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par E. Reynier, 1888, p. 193.

qui, appliqué dernièrement à Hanovre, à Dresde et à Berlin, a donné de bons résultats et va, paraît-il, être essayé sur différents réseaux français[1].

A l'étranger, le système de traction par accumulateurs reçoit de nombreuses applications ; on le rencontre en Angleterre où il a été installé en 1890, en Hollande, en Belgique, en Autriche et en Allemagne.

Aux Etats-Unis où ce système avait déjà été essayé il y a quelques années (1889), puis momentanément abandonné, nous le voyons réapparaître de nouveau à New-York, sur l'avenue Madison.

Il y a dans la traction électrique par accumulateurs deux éléments principaux :

1° Les accumulateurs qui reçoivent l'énergie électrique et la restituent ensuite, pour produire la force motrice ;

2° Les dynamos réceptrices qui transmettent cette énergie aux roues du véhicule.

Nous examinerons successivement ces deux points.

ACCUMULATEURS

Description. Principe. — Lorsque deux plaques de plomb sont baignées dans un bac rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique (électrolyte) et qu'on fait passer à travers ces deux plaques (électrodes) un courant électrique continu, l'eau est décomposée ; l'oxygène se porte sur la plaque de plomb par laquelle arrive le courant (anode), en formant une substance brune qui est du peroxyde de plomb ; l'hydrogène se rend sur la plaque par laquelle sort le courant (cathode), en formant du plomb spongieux.

Si on supprime le courant électrique, on remarque de suite une différence de potentiel entre les deux plaques, et si on les réunit par un fil, un courant s'établit entre l'anode et le cathode, courant

[1] Au moment de mettre sous presse, nous apprenons que la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine va appliquer le système de traction mixte sur ses lignes de la Place de la République à Pantin et Aubervilliers. La traction se fera par trolley en dehors de Paris jusqu'aux fortifications, et par accumulateurs, rechargés en route au moyen du trolley, dans l'intérieur de Paris. Les travaux se poursuivent activement et seront terminés prochainement.

qui pourra servir à produire une force permettant d'actionner un appareil moteur intercalé sur ce fil.

Par la première opération, nous avons obtenu une réaction chimique qui a eu pour résultat la production d'une certaine quantité d'électricité, douée d'un certain potentiel.

Par la seconde, nous récupérons cette quantité d'électricité, en produisant une nouvelle réaction chimique dans les électrodes. D'après la théorie qui paraît la plus accréditée aujourd'hui, cette réaction chimique serait une *double sulfatation*, les deux électrodes étant transformées en sulfate de plomb.

Dans la seconde opération, l'électrode par laquelle sort le courant porte le nom de *plaque positive*, et l'autre de *plaque négative*.

La quantité d'électricité qu'on peut ainsi fournir atteindra son maximum au bout de 2 ou 3 mois de charges et de décharges successives. Ces opérations de charges et de décharges successives, dans le but de former l'accumulateur, portent le nom de *formation Planté*, du nom de l'électricien qui l'appliqua pour la première fois en 1860.

Cette méthode est, comme on le voit, très longue, et ce n'est qu'au bout de plusieurs mois que les accumulateurs peuvent être considérés comme formés. C'est là un grave inconvénient, au point de vue industriel et pratique ; aussi a-t-on essayé d'y remédier.

Vers 1880, Faure eut l'idée de mettre à la surface du plomb une matière déjà active par elle-même, ou du moins une matière qui pouvait très facilement être transformée en matière active ; il recouvrait, dans ce but, les électrodes d'une couche d'oxyde de plomb. Mais l'adhérence entre ces deux matières était insuffisante et les décollages étaient fréquents ; c'est alors que Volckmar proposa de remplacer les plaques de plomb lisses par des plaques treillagées, formant des alvéoles dans l'intérieur desquels était intercalée la matière active.

Le minium, à la charge, se transforme en peroxyde de plomb et la litharge en plomb spongieux. Quant au quadrillage, il est formé de plomb antimonieux, afin d'en éviter l'usure rapide, suivant le procédé Sellon.

Ce type d'accumulateur porte le nom de Faure-Volckmar-Sellon et est celui employé par l' « *Electric Storage Company* » (fig. 19).

Par cette disposition, on active dans une grande proportion la formation des accumulateurs ; une seule charge suffit. Elle porte le nom de *procédé Faure*.

Le peroxyde de plomb, qui forme la partie active des électrodes positives, tombe rapidement au fond des bacs, par suite des charges et des décharges successives ; la durée des plaques positives se trouve ainsi réduite ; quant aux plaques négatives, elles ne subissent qu'une détérioration presque nulle et elles ont une durée

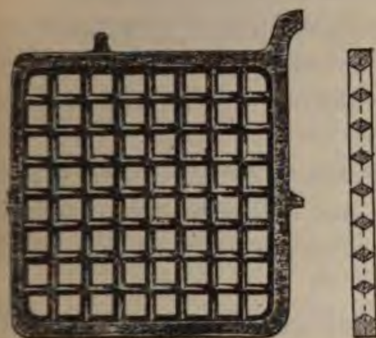


Fig. 49.
Plaques Faure-Volckmar-Sellon.

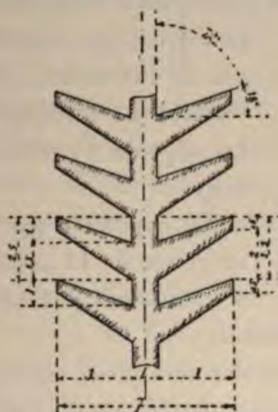


Fig. 50. — Plaques de la Société pour le travail électrique des métaux.

bien supérieure à celle des premières, mais encore inconnue.

Dans le but d'éviter, ou du moins de diminuer cette chute du peroxyde dans les bacs, on a étudié certaines dispositions de plaques ; nous en citerons quelques-unes, celles qui ont reçu des applications à la traction mécanique des tramways.

La *Société pour le Travail électrique des métaux* emploie, pour les plaques positives de ses accumulateurs, une plaque en plomb antimonieux en forme d'arête de poisson (fig. 50), ayant latéralement des augets s'ouvrant vers le haut ; ces augets sont remplis de peroxyde de plomb qu'on malaxe avec de l'acide sulfurique ; la forme de ces augets n'empêche pas complètement la chute du peroxyde, mais elle la retarde ; le réempâtage en est du reste facile.

C'est ce dispositif qui a été adopté pour les plaques positives des nouveaux accumulateurs en service sur les tramways de

Paris à Saint-Denis et à Neuilly, appartenant à la Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine.

Quant aux plaques négatives, on a conservé la disposition primitive des plaques à pastilles où la matière active est obtenue par la réduction du chlorure de plomb en plomb spongieux. Ces plaques ont une hauteur de 0,200 m., une largeur de 0,200 m. et une épaisseur pour les plaques positives de 7 mm. et, pour les plaques négatives, de 6 mm.

Les résultats obtenus ont été satisfaisants. La durée des plaques positives, qui autrefois, avec les types à pastilles, n'était que de 14 000 km., a été portée, paraît-il, à 100 000 km. environ, avec une dépense de réempâtage tous les 14 000 km. La dépense d'entretien semblerait donc sensiblement diminuée.



Fig. 51.

La capacité, par kilogramme de ces plaques, est en moyenne de 13 ampères-heure et leur débit peut être porté à 4 ampères par kilog. en moyenne, et à 12 ampères au maximum.

Tout dernièrement, enfin, la Compagnie chargée aujourd'hui de la traction des lignes de Paris à Saint-Denis et à l'Opéra, a modifié le type précédent en employant des plaques en plomb doux, mais où les vides réservés pour la matière active ont la forme indiquée par la figure 51, c'est-à-dire traversent toute l'épaisseur de la plaque. La disposition des plaques positives et négatives est la même, sauf la litharge, comme matière active, pour les négatives.

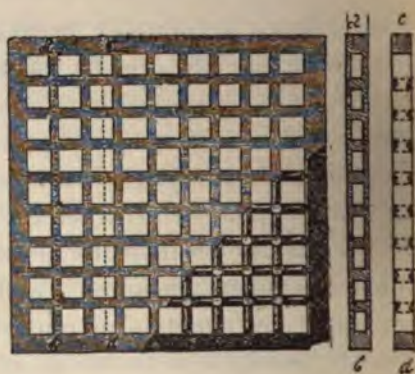


Fig. 52. — Plaques de l'usine de Hagen.

Les électrodes de l'accumulateur de l'usine de Hagen, près de Cologne, employé sur un certain nombre de lignes de tramways en Allemagne, ont leur matière active placée à l'intérieur de deux grillages parallèles formant parois (fig. 52).

La matière active se compose de plomb pulvérisé mêlé à de la ierre ponce pour les plaques positives et de litharge pour les laques négatives.

Nous citerons encore l'accumulateur « Tudor », présenté par la figure 53. La plaque est en plomb ur, muni de rainures remplies comme matière active e minium ou de litharge. Ces plaques sont d'abord oumises à une formation Planté, de charges et de écharges successives, pendant environ deux mois, uis les rainures sont remplies de matière. Comme lans tous les autres systèmes, la matière active tombe peu à peu en poussière, mais d'un autre côté, le plomb pur de la plaque se forme de plus en plus et il arrive qu'au bout l'un certain temps l'électrode agit comme si elle était complètement composée de plomb pur et devient alors un accumulateur Planté.

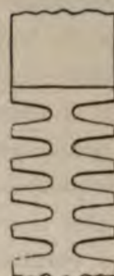


Fig. 53. Plaques Tudor.

L'accumulateur Tudor que nous venons de décrire est un accumulateur tenant le milieu entre le Planté pur et le Faure, dans lequel les oxydes détruits sont remplacés peu à peu par la formation Planté, faite primitivement.



Fig. 54. — Plaques positives Tudor (dernier type).

Dans le nouvel accumulateur Tudor, l'électrode positive est une plaque de plomb chimiquement pur, ayant une surface développée très considérable et qu'on recouvre en peu de semaines d'une couche Planté, qui permet d'éviter l'emploi d'oxydes artificiels.

L'électrode négative est toujours une électrode genre Faure, ayant comme matière active de la litharge avec du minium.

La figure 54 représente les plaques positives. Celles-ci sont formées de lamelles superposées d'environ 10 mm. de longueur, ayant au centre 1 mm. d'épaisseur et finissant en pointe aux extrémités. Cette disposition donne une très grande surface exposée à l'action

de l'électrolyte : près de 25 dcm² par kg. d'électrode. On pe[ut] obtenir ainsi, d'après les inventeurs, des densités de courant tr[ès] élevées par kg., à la charge et à la décharge, sans influence nota[ble] sur la capacité utilisable, mais qui paraît cependant comp[ro]mettre la durée de ces accumulateurs. De là, les accumulateu[rs] dits à *charge rapide*, c'est-à-dire ceux dans lesquels le coura[nt] dépensé peut être restitué en un temps très court, par suite d[e] l'emploi de courants intenses.

Ces nouveaux accumulateurs sont employés pour la tractio[n] des voitures sur les lignes de la Compagnie des tramways Nen et du département de la Seine, entre la Madeleine et Neuilly, qu[e] nous décrirons à la fin de ce chapitre.

Les accumulateurs dont nous venons de parler sont tous à base de plomb ; ce sont les seuls employés jusqu'ici pour la traction des tramways.

Différents essais ont été faits, toutefois, pour remplacer les électrodes en plomb par de la poudre de cuivre agglomérée sous pression et sertie dans un cadre en cuivre pour les plaques positives, et par des tôles de fer étamé et amalgamé pour les plaques négatives (accumulateurs Commélin, Desmazures et Bailhache).

On peut citer encore l'accumulateur américain Waddel-Entz, essayé sur un tramway à Vienne (Autriche), où l'électrode négative est constituée par le récipient en tôle et par une série de plaques verticales en acier perforées, et l'électrode positive par du fil de cuivre rouge entouré d'une pâte constituée par de l'oxyde de cuivre [1]. L'électrolyte est du zincate de potasse.

Mais ces différents accumulateurs n'ont pas donné jusqu'ici de résultats satisfaisants, car ils ont l'inconvénient de perdre la charge à cause des réactions locales, et les essais ne paraissent pas avoir été poursuivis.

Montage des batteries. — Comme nous venons de le voir, un élément se compose d'une ou plusieurs plaques positives et d'une ou plusieurs plaques négatives ; la réunion de deux, ou d'un plus grand nombre de ces éléments, forme ce que l'on applle une *batterie d'accumulateurs*.

[1] Voir l'*Electricien* du 10 août 1895.

Pour composer une batterie, on peut grouper les éléments de deux manières différentes :

1° En série ou en tension.

2° En quantité ou en parallèle.



Fig. 55.

Ces deux modes de groupement ont une très grande importance au point de vue de la traction des tramways, comme nous le verrons par la suite.

1° Dans le montage en série, le pôle positif d'un élément est relié au pôle négatif de l'élément suivant. A chaque extrémité de la batterie se trouvent deux pôles libres, l'un positif, l'autre négatif, comme l'indique la figure 55.

Dans cette disposition de batterie, la capacité totale est égale à

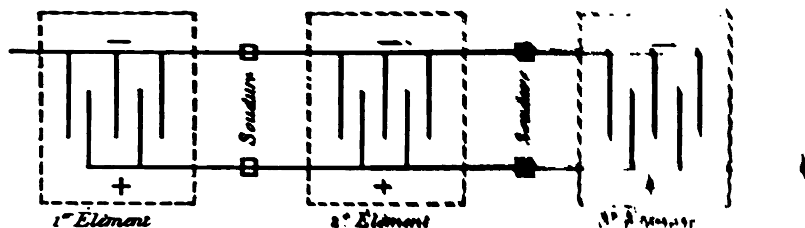


Fig. 56.

la capacité d'un élément, et la force électromotrice égale à celle d'un élément multipliée par le nombre de ceux-ci. Il en est de même de la résistance.

2° Dans le montage en quantité ou en parallèle, le pôle négatif d'un élément est relié au pôle négatif du suivant, de même pour les pôles positifs. On a ainsi la disposition représentée par la figure 56.

Ici, la capacité totale est égale à celle d'un élément multipliée par le nombre de ces éléments, et la force électromotrice est égale à celle d'un seul élément. La résistance intérieure est égale à celle d'un élément divisée par le nombre de ceux-ci.

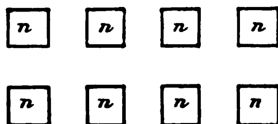


Fig. 57.

Outre ces deux combinaisons, on peut en former une troisième, très fréquemment employée pour la traction des tramways par accumulateurs ; c'est une combinaison mixte.

Soit (fig. 57) un certain nombre d'éléments n en série dans une sous-batterie et soit m le nombre de ces sous-batteries.

Ces sous-batteries pourront être *toutes* mises en série ou parallèle, comme dans le cas précédent; mais on pourra aussi en mettre un certain nombre en série en laissant les autres en parallèle, et on pourra obtenir de cette façon des forces électromotrices et des intensités de courant variables suivant l'effort à produire. Nous verrons plus loin comment on obtient sur les voitures ces différentes combinaisons des sous-batteries, au moyen d'un contrôleur.

ÉLÉMENTS DES ACCUMULATEURS

Bacs. — Les différents éléments qui constituent les accumulateurs sont disposés dans des bacs et ceux-ci sont réunis dans une ou plusieurs caisses devant constituer la batterie.

Lorsqu'il s'agit d'accumulateurs transportables, comme c'est le cas pour la traction des voitures, les bacs se font en celluloïde, en ébonite ou mieux avec une composition de déchets d'ébonite et d'amiante, de manière à les rendre aussi légers que possible. Les plaques, qui sont toujours placées verticalement, sont maintenues à une certaine distance les unes des autres, au moyen de bandes isolantes en caoutchouc ou de lames, baguettes ou tubes en verre.

Dans chaque élément on relie électriquement les plaques positives, afin de former l'électrode positive ; on fait de même pour les plaques négatives, en ayant soin d'isoler complètement les deux électrodes. Chaque plaque est munie d'une queue émergeant

de l'électrolyte et permettant de faire les liaisons des plaques du même nom ou des différents éléments. Les queues des éléments positifs sont généralement placées d'un côté du bac et celles des éléments négatifs de l'autre.

Quant aux caisses qui réunissent ensemble tous les bacs, elles sont presque toujours en bois.

Électrolyte. — L'électrolyte est, comme nous l'avons dit, composé d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique.

L'acide sulfurique employé est de l'acide à 66° Baumé, exempt de métaux en dissolution et de vapeurs nitreuses, sans quoi la capacité de la batterie diminuerait considérablement. Pour la même raison, il faut se servir d'eau distillée, ou au moins d'eau de pluie.

Le mélange doit se faire avec soin et au moyen d'appareils disposés à cet effet, en ayant soin de verser l'acide dans l'eau et non l'eau dans l'acide, afin d'éviter les projections dues à l'élévation rapide de la température.

La densité du mélange doit être telle qu'à la fin de la charge elle ne soit pas suffisante pour produire une sulfatation ou pour que le plomb spongieux des plaques négatives ne décompose pas l'acide, en produisant des dégagements gazeux. Cette densité varie entre 25 et 32° Baumé, correspondant à un poids spécifique de 1,26. La densité ne doit pas non plus être trop faible, sans quoi la force électromotrice des éléments s'affaiblirait.

Il est admis que cette densité ne doit pas descendre au-dessous de 25° Baumé, correspondant à un poids spécifique de 1,17.

Nous venons de décrire les différents éléments qui constituent une batterie d'accumulateurs ; nous allons maintenant examiner les différentes opérations à faire pour produire une force motrice avec cette batterie. Pour cela nous avons à examiner : sa *mise en charge*, puis sa *décharge*.

Charge. — Mettre en charge un accumulateur, c'est fournir à chacun de ses éléments, au moyen d'une dynamo à courant continu, l'énergie électrique que ces éléments peuvent absorber.

Cette mise en charge doit se faire avec un courant dont l'intensité doit être limitée, afin d'éviter la désagrégation de la matière

active, son décollage du support et le gondolement des plaques.

L'intensité de ce courant dépend, sans aucun doute, du type d'accumulateur employé et les constructeurs la fixent, généralement, en livrant leurs appareils. On peut dire, toutefois, qu'elle varie entre le cinquième et le dixième de la capacité totale; ordinairement c'est le cinquième.

Ainsi un accumulateur, ayant une capacité de 12 ampères-heure par kilogramme de plaque, devra être mis en charge avec un courant de 2, 4 ampères par kilogramme de plaque et, par conséquent, sa mise en charge durera cinq heures.

Si l'intensité du courant avait été fixée au dixième de la capacité, c'est-à-dire à 1,20 ampères, la durée de la mise en charge serait de dix heures.

La mise en charge d'une batterie se fait en mettant les éléments en série ou quelquefois en quantité; la tension de la dynamo productrice de l'électricité sera donc, dans le premier cas, égale au nombre d'éléments, multiplié par la force électromotrice de chaque élément.

Cette force électromotrice n'est pas constante pendant toute la durée de la charge, comme l'indique la figure 58. Au début, elle est d'environ 2 volts pour s'élever rapidement à 2, 15 volts, tension qu'elle conserve pendant une grande partie de la durée de la mise en charge ; puis elle s'élève rapidement vers la fin de l'opération jusqu'à 2,50 volts et alors l'augmentation de tension cesse de croître. C'est à ce moment qu'il faut cesser la charge, pour éviter les inconvénients dont nous avons parlé plus haut, et c'est par ce chiffre de 2,50 volts qu'il faudra multiplier le nombre des éléments pour obtenir la tension maximum de la dynamo productrice de l'électricité.

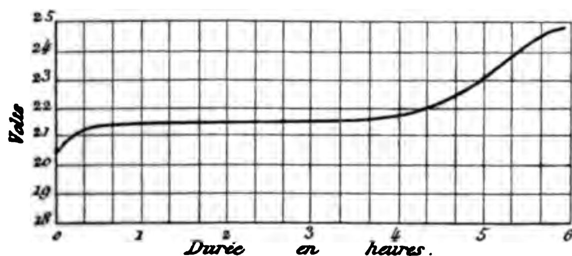


Fig. 58.

Il ne faut pas oublier, toutefois, que ce chiffre est une moyenne, s'écartant très peu, il est vrai, de la vérité, mais qui peut varier

suivant le type d'accumulateur. Une batterie ne doit jamais être surchargée ; il faut donc surveiller avec grand soin cette limite de tension maximum, au moyen d'un voltmètre.

La mise en charge d'une batterie peut s'opérer de trois manières différentes :

1° A potentiel constant ;

2° A intensité constante ;

3° A puissance constante.

Nous ne parlerons que de la première parce qu'elle est la plus simple, surtout au point de vue de la conduite de la machine dynamo, et parce que c'est celle qui est la plus fréquemment employée ; la Compagnie des tramways nord l'a adoptée pour les tramways de l'Opéra et de la Madeleine, dans son usine de Saint-Denis.

On emploie ordinairement une dynamo à enroulement compound qui maintient un champ magnétique constant. Lorsque la mise en charge est commencée ; l'enroulement shunt s'emploie aussi. La tension, qui devra être constante pendant toute la durée de l'opération, devra être un peu supérieure à la force électromotrice de la

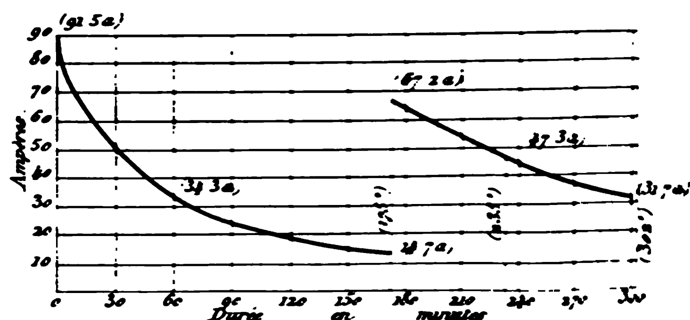


Fig. 59.

batterie. Quant à l'intensité du courant, elle ne sera pas constante et dépassera de beaucoup, au début, la limite que nous avons indiquée ; mais cela n'aura pas d'inconvénients, parce que, à ce moment, toute la matière active est complètement déchargée. Du reste, cette intensité du courant ira vite en diminuant, suivant une courbe hyperbolique, comme l'indique la figure 59, et à la fin, au bout des cinq heures, le courant aura une intensité bien inférieure

à celui indiqué, ce qui est évidemment avantageux, puisque alors la matière active est presque entièrement chargée.

Comme l'indique la courbe de la figure 59, l'énergie électrique accumulée croît très rapidement au début; d'après des expériences faites au chemin de fer du Nord par M. Aliamet, avec une durée totale de charge de huit heures, l'énergie emmagasinée au bout d'une heure est de 50 p. 100, au bout de deux heures de 75 p. 100 et au bout de quatre heures de 86 p. 100 de la capacité totale. C'est évidemment un grand avantage, dans certains cas, puisque, par ce moyen et dans un cas urgent, on peut avoir, au bout de peu de temps, une batterie contenant une grande quantité d'énergie et ne pas attendre la fin de la charge pour la mettre en service. On trouve une application de ce fait dans les nouveaux accumulateurs « Tudor », dits à charge rapide.

Comme on le voit, l'intensité du courant est assez grande au début, et peut dépasser, dans une trop forte proportion, celle indiquée. Pour éviter cet inconvénient, la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine fait à Saint-Denis la mise en charge de ses batteries sous *deux potentiels*. C'est cette opération que représente la figure 59. Il s'agit de la charge de 108 éléments, contenant chacun onze plaques et pesant 22 kg. (charge 220 ampères-heure). Pendant trois heures, la tension est de 260 volts, soit 2,40 volts par élément, et pendant le reste du temps la tension est de 280 volts, soit 2,60 volts par élément.

L'intensité du courant a varié, dans la première partie de la charge, entre 91,5 et 14,7 ampères, soit de 5,35 ampères à 0,70 ampères par kilogramme de plaque et, pendant la seconde partie, de 67,20 ampères à 31,7 ampères, soit, par kilogramme de plaque, de 3,20 à 1,50 ampères. La durée de la charge a été de 302 minutes.

Si la mise en charge avait été faite en une seule fois, elle eût duré 360 minutes avec une intensité au début de 135 ampères, soit 6,44 ampères par kilogramme de plaque, et, à la fin de 15 ampères, soit 0,71 ampères par kilogramme.

On fixe la quantité d'ampères-heure à fournir à la batterie en se basant sur la quantité dépensée en service; on augmente cette

quantité de 20 p. 100, pour tenir compte du rendement en quantité des accumulateurs qui, comme nous le verrons plus loin, peut être admis de 80 p. 100.

Décharge. — Nous avons vu (fig. 58) que, pendant la charge, la force électromotrice de chaque élément allait d'abord en croissant, pour rester ensuite stationnaire et croître enfin vers la fin de la charge. Nous avons vu également qu'il fallait, pour ne pas surcharger la matière active, arrêter l'opération lorsque la force électromotrice atteignait 2,50 volts.

Si, à ce moment, nous coupons le circuit avec la dynamo de charge et que nous mesurions la force électromotrice de l'élément, nous trouverons qu'il ne sera plus de 2,50 volts, mais sera tombé à 2,1 volts environ. Cette perte de tension est due, d'abord aux résistances intérieures de l'élément et ensuite à certaines actions locales.

Si nous opérons maintenant la décharge de la batterie et que nous observions avec un voltmètre la force électromotrice de l'élément, pendant cette décharge, nous verrons (fig. 60) que celle-ci ira d'abord en s'abaissant rapidement, pour décroître ensuite d'une manière lente et régulière pendant la plus grande partie de la durée de la décharge; la diminution s'accentuera alors rapidement vers la fin. C'est de la force électromotrice moyenne, c'est-à-dire celle comprise entre 1,9 volt et 1,80 volt dont nous avons principalement besoin, puisque c'est celle qui a la durée la plus longue. D'un autre côté, il ne faut pas user d'une force électromotrice trop faible, car il y aurait à craindre la sulfatation des électrodes; généralement, on arrête la décharge, lorsque le voltage de chaque élément atteint 1,80 volt et on admet, en pratique, une force électromotrice moyenne pour chaque élément de 1,85 volt.

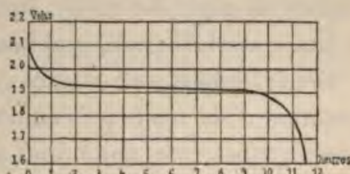


Fig. 60.

Il ne faut pas confondre cette force électromotrice d'un élément avec la différence de potentiel aux bornes de cet élément, car celle-ci, dans le cas de la décharge de la batterie, est inférieure à la

force électromotrice d'une quantité égale au produit R I, R étant la résistance intérieure d'un élément.

Dans le cas de la charge, au contraire, la force électromotrice dans chaque élément sera inférieure à la différence de potentiel aux bornes, de toute la résistance de chaque élément.

Nous connaissons les éléments constitutifs d'une batterie d'accumulateurs, les opérations nécessaires pour sa mise en charge, ainsi que les phénomènes qui se produisent pendant la décharge. Nous avons maintenant à voir quelle est la quantité d'énergie que nous pourrons emmagasiner dans cette batterie et quelle sera celle dont nous pourrons disposer pour produire la force motrice, ou inversement.

Nous avons donc à examiner ce qu'on appelle la *capacité* de la batterie en quantité et en énergie, ainsi que le rendement de cette batterie également en quantité et en énergie.

Capacité spécifique. — La capacité spécifique d'un élément est la quantité d'électricité qui peut être restituée par kilogramme d'électrode de cet élément ou par centimètre carré de surface de cette électrode, lorsque la décharge est poussée jusqu'à la limite de 1,85 volt, que nous avons indiquée plus haut.

Généralement, en France, cette capacité est rapportée au kilogramme d'électrode pris comme unité et est exprimée en ampères-heure; c'est une unité tout arbitraire qui ne permet pas la comparaison des plaques des divers constructeurs.

La *capacité totale* est la quantité totale d'électricité emmagasinée dans chaque kilogramme; elle est toujours supérieure à la quantité restituée, c'est-à-dire à la capacité spécifique.

La capacité d'un élément dépend du débit à fournir par cet élément, c'est-à-dire de la rapidité avec laquelle il sera déchargé; elle est en raison inverse de ce débit et varie dans de grandes proportions avec lui.

Ordinairement, dans le calcul des batteries, on compte sur un débit moyen de 2 ampères; mais il arrive souvent, surtout sur les lignes de tramways accidentées, que ce débit est dépassé et atteint jusqu'à 5 ampères et même 8 ampères, au détriment, il est vrai, de la capacité et du bon état de conservation. Mais ce débit dépend

beaucoup de la différence de potentiel utile aux bornes des accumulateurs. Les éléments employés actuellement paraissent, cependant, supporter assez bien ces variations de charge, si toutefois elles ne sont pas trop fréquemment répétées.

Il est assez difficile de fixer d'une manière bien exacte la capacité spécifique; elle varie avec les types employés et cela dans d'assez grandes limites; elle est bien indiquée par les constructeurs d'accumulateurs, mais ces indications sont souvent exagérées et dépassent les chiffres qu'on obtient en pratique.

Avec les débits indiqués plus haut, on peut cependant prendre, comme moyenne de la capacité spécifique des accumulateurs actuellement en service pour la traction mécanique des tramvays, les chiffres de 10 à 12 ampères-heure; avec un débit supérieur cette capacité diminuera. C'est celle obtenue, en pratique, sur les tramvays de Saint-Denis à la Madeleine et à l'Opéra.

La capacité utile d'un élément sera évidemment ce chiffre multiplié par le poids de l'élément, et celui de la batterie, ce dernier résultat multiplié par le nombre d'éléments.

Énergie. — L'énergie électrique sera égale à la capacité spécifique multipliée par la force électromotrice moyenne de chaque élément et que nous avons dit plus haut être de 1,85 volt.

Rendement. — Il y a deux sortes de rendements à considérer : le rendement *en quantité*, c'est-à-dire en ampères-heure, et le renment *en énergie*, c'est-à-dire en watts-heure.

Le rendement en quantité est le rapport entre la quantité d'ampères-heure restitués à la décharge à la quantité d'ampères-heure fournis à la charge. Ce chiffre peut atteindre 85 p. 100, mais il est toujours plus près de 80 p. 100, et c'est ce dernier chiffre qu'il faut prendre pour calculer la quantité d'électricité à fournir à la batterie lorsqu'elle sera épuisée.

Le rendement en énergie est le rapport entre l'énergie retrouvée à la décharge et celle fournie pendant la charge. Il est évidemment inférieur au rendement précédent, puisqu'ici la force électromotrice entre en jeu. Il ne faut pas compter, dans ce cas, sur un rendement supérieur à 70 p. 100.

Résistance intérieure des éléments. — Cette résistance intérieure semble, d'après les expériences d'Ayrton, être plus grande pendant la charge que pendant la décharge. Elle dépend de la densité de l'électrolyte, de l'état des matières actives, de l'étendue en surface des plaques ainsi que de leur espacement, et du degré d'avancement de la charge et de la décharge. Elle est maximum à la fin de la charge et de la décharge.

Ayrton indique que cette résistance est, par décimètre carré de surface de plaque, de 0,10 à 0,13 d'ohm. à la charge, et de 0,08 à 0,09. d'ohm. à la décharge, pour un débit de 1 ampère par décimètre carré.

Exemple. — Comme exemple, prenons la batterie d'accumulateurs des premières voitures des tramvays de Saint-Denis-Opéra-Madeleine, qui se compose de 108 éléments de 22 kg. chacun et dont la capacité totale est de 13 ampères-heure.

La capacité de la batterie sera de :

$$13 \times 22 \times 108 \times 3\,600 = 111\,196\,800 \text{ amp.};$$

ce qui, en supposant un débit de 2 ampères, par kilogramme, qui est celui employé comme moyenne, donnera comme durée de la batterie en temps :

$$\frac{111\,196\,800 \times 0{,}85}{2 \times 22 \times 108 \times 3\,600} = 5{,}30 \text{ h.}$$

L'énergie dont on pourra disposé sera de :

$$0.7 \times 13 \times 22 \times 108 \times 1{,}85 \text{ v.} \times 3\,600 = 143\,999\,828 \text{ watts.}$$

soit :

$$\frac{143\,999\,828}{9{,}8} = 14\,693\,855 \text{ kgm.}$$

Si nous admettons que la résistance moyenne à la traction est, comme l'expérience semble l'indiquer, de 12 kg. par tonne pour des automotrices pesant 14 t., nous aurons comme travail à produire par kilomètre à la jante des roues :

$$14 \times 12 \times 1\,000 = 168\,000 \text{ kgm.};$$

et aux bornes de la dynamo, en supposant un rendement de 0,65,

qui est celui qu'on peut admettre dans ce cas, celle-ci ne travaillant pas à charge complète :

$$\frac{168\,000}{0,65} = 258\,000 \text{ kgm}.$$

Le parcours que la batterie d'accumulateurs pourra faire sera donc :

$$\frac{14\,693\,855}{258\,000} = 56,9 \text{ km}.$$

La batterie ayant une capacité totale de 111 196 800 amp., nous aurons à fournir par seconde à la charge une quantité d'électricité de :

$$\frac{111\,196\,800}{5 \times 3\,600} = 6\,178 \text{ amp}.$$

la durée de la charge étant de cinq heures, ou par kilogramme de plaque : $\frac{6\,178}{22 \times 108} = 2.60$ amp. Ce courant de charge est une moyenne, car nous avons vu plus haut qu'il était beaucoup plus élevé au début et inférieur à la fin.

Le travail moyen par seconde pour charger la batterie sera donc de :

$$\frac{22 \times 108 \times 2,60 \text{ v.} \times 2.60 \text{ amp.}}{735 \times 0,65} = 33.50 \text{ chev.};$$

en admettant un rendement de 0,65 pour les dynamos et les transmissions.

Cette puissance moyenne en chevaux est un maximum, car la batterie ne doit jamais revenir complètement épuisée, et le travail se trouve réduit.

Force motrice des voitures. — La force motrice, nécessaire à la propulsion des voitures, s'obtient au moyen de dynamos actionnant presque toujours par engrenages, simples ou doubles, les essieux de cette voiture ; généralement il y a une dynamo par essieu, et celles-ci reçoivent l'énergie électrique par l'intermédiaire d'un coupleur qui a pour but de permettre de faire varier soit la force électromotrice, soit le champ magnétique de la dynamo, suivant les besoins du service.

Ces dynamos réceptrices sont, comme toutes les dynamos,

composées d'un induit tournant dans un champ magnétique formé par des électro-aimants ; seulement, au lieu de faire tourner l'induit pour produire un courant, comme dans les dynamos génératrices, c'est le courant qui produit la rotation de cet induit et donne le couple moteur. Les induits sont en anneau ou en tambour, mais assez généralement en anneau du type Gramme.

Sans nous étendre longuement sur les dynamos réceptrices, nous indiquerons, toutefois, les différents principes qui règlent leur fonctionnement. Nous rappellerons, à ce sujet, les formules qui indiquent les relations entre le couple moteur, l'intensité du courant, la force électromotrice et les différents éléments qui constituent la dynamo.

Soit :

D le diamètre des roues du véhicule ;

r' le rapport des vitesses angulaires du moteur et de l'essieu;

F l'effort total de traction, en y comprenant les résistances du mécanisme. Dans le cas de deux moteurs par voiture, l'effort à appliquer à chaque dynamo sera $\frac{F}{2}$;

C le couple moteur à développer par l'induit de chaque moteur du véhicule ;

i le courant venant de la batterie d'accumulateurs ou de la génératrice et traversant la dynamo ;

n le nombre de spires de l'induit ;

N le nombre de tours de l'induit par seconde ;

R la résistance intérieure de la réceptrice ;

E la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice ;

$\mathfrak{N}$ le flux total de force dans l'induit ;

e la force contre-électromotrice.

$$C = \frac{FD}{4r'} \quad (1) \qquad C = \frac{in\mathfrak{N}}{2\pi} = \frac{ei}{2\pi N} \quad (2)$$

$$i = \frac{E - e}{R} \quad (3) \qquad e = nN\mathfrak{N} \quad (4)$$

Ces formules permettent, étant admis les efforts et les vitesses à obtenir, de calculer les différents éléments de l'induit de la dynamo réceptrice.

Excitation. — Les dynamos peuvent être excitées de deux manières différentes : soit par *dérivation*, soit en *série* :

1° *Par dérivation.* — Nous remarquerons que, dans ce cas, le champ magnétique sera, pour ainsi dire, constant, surtout si la saturation est presque complète. Si le couple moteur vient à augmenter, par suite d'un effort à produire, une rampe par exemple, nécessitant une augmentation de l'intensité du courant, quelle influence cette augmentation de courant aura-t-elle sur la vitesse de rotation ?

Combinant les deux formules (3) et (4) nous obtiendrons :

$$N = \frac{E - Ri}{n\mathcal{H}};$$

$\mathcal{H}$ étant, comme nous venons de le dire, à peu près constant, toute augmentation du courant i aura pour conséquence de diminuer la vitesse N ; mais, comme la résistance R est toujours très faible, cette variation sera presque nulle en présence de E ; il en résultera que les variations de N seront elles-mêmes peu importantes. La vitesse du véhicule variera donc dans de faibles limites, quand l'effort à produire augmentera ou diminuera. C'est évidemment un avantage.

Mais si, d'un autre côté, nous prenons dans la formule (2) :

$$i = \frac{C}{\mathcal{H}\frac{n}{2\pi}},$$

nous voyons que le courant augmentera dans une forte proportion lorsque le couple, ou l'effort à produire, augmentera de son côté. Il pourrait même arriver que cette intensité de courant devienne trop considérable. C'est ce grave inconvénient qui fait que les dynamos réceptrices, excitées en dérivation, sont peu employées. Elles ont cependant reçu dernièrement quelques applications pour la traction électrique par accumulateurs, comme nous le verrons plus loin ; mais il s'agissait d'un cas tout à fait spécial où le système d'excitation par dérivation était indispensable ;

2° *En série*. En examinant la formule ci-dessous, nous voyons

$$C = \frac{in\mathcal{N}}{2\pi},$$

que i et $\mathcal{N}$ croissant en même temps, le couple C atteindra une valeur très grande au moment du démarrage où la force contre-électromotrice est nulle. Cette formule montre également que, dans le cas d'un électromoteur en dérivation, le couple maximum a lieu aussi au moment du démarrage ; mais, comme la valeur $\mathcal{N}$ du flux magnétique varie peu, cette augmentation ne résultera que de l'accroissement du courant i ; le couple de démarrage sera donc inférieur à celui obtenu avec le moteur excité en série.

L'équation : $N = \frac{E - Ri}{n\,\mathcal{N}}$ indique que lorsque le courant augmente, le numérateur diminue et comme, d'un autre côté, le champ magnétique $\mathcal{N}$ augmente aussi, le dénominateur augmente et par suite N diminue ; les variations de vitesse peuvent donc être assez grandes, suivant les efforts à produire. Si, au contraire, l'effort à produire diminue, i et $\mathcal{N}$ vont diminuer, N augmentera et pourra prendre une grande valeur et le moteur pourra s'emballer. Dans le but d'éviter ces inconvénients dus à de trop grandes variations de vitesse, on cherche à donner à $\mathcal{N}$ une très grande valeur, en produisant un champ magnétique très puissant pour l'intensité moyenne du courant. On dispose en conséquence l'enroulement sur les inducteurs ; on rend ainsi également nul l'angle de calage des balais, comme nous le verrons plus loin.

C'est ce système d'excitation qui est le plus généralement employé pour la traction électrique.

Angle de calage. — L'angle de calage est celui dont doit être déviée, par rapport à l'axe neutre, la position des balais.

Cet angle de calage dépend des réactions de l'induit, de la self-induction des spires, de l'hystérésis du noyau et de l'intensité du courant. Il est donc variable.

Toutefois, en employant un champ inducteur puissant, on peut diminuer dans une forte proportion les effets de la réaction de l'induit et faire que la ligne de calage reste fixe et concordante avec l'axe neutre.

C'est ce que l'on fait généralement dans les réceptrices employées pour la traction électrique.

Par suite du frottement et des étincelles, les balais en toile métallique qui étaient autrefois d'un usage général, s'usaient rapidement ainsi que le collecteur. On emploie aujourd'hui très avantageusement des balais en charbon, placés perpendiculairement sur le collecteur et dont la durée est très grande. Ils se prêtent d'ailleurs avec plus de facilité à la marche dans les deux sens.

Changement de marche. — Le changement de marche de la dynamo réceptrice peut s'obtenir de deux façons :

1° On peut changer le sens du courant dans les inducteurs, sans changer celui de l'induit, ce qui a pour conséquence de changer la polarité des électro-aimants. Ce système est souvent employé, mais il a l'inconvénient de provoquer sur les collecteurs de fortes étincelles d'extra-courants qui mettent leurs contacts rapidement hors de service ;

2° On peut conserver la direction du courant dans les inducteurs et changer celle de l'induit, en intervertissant les deux balais.

Soit (fig. 61) une dynamo motrice excitée en série ; dans le cas de la rotation indiquée par la flèche f, les balais auraient la position 1 et 2, en arrière de l'axe neutre de l'angle α.



Fig. 61.

Si on veut obtenir une rotation en sens inverse indiquée par la flèche f', les balais devront occuper les positions 3 et 4 telles que 3 se trouve en arrière de l'axe neutre de α; de même pour 4.

Le balai 1 qui doit venir en 3 et le balai 2 en 4 devra parcourir l'angle π-2 α.

Les courants seront donc inversés dans l'induit et le sens de la rotation également inversé.

On voit donc que dans l'un et l'autre cas, soit en changeant le sens du courant dans les inducteurs, soit dans les induits, il faut faire tourner les balais de π-2α, dans le cas d'un inducteur bipolaire. C'est un inconvénient qu'on peut éviter en employant, comme

nous l'avons dit plus haut, un champ inducteur puissant qui fait concorder la ligne de calage avec l'axe neutre.

Dans ce cas, le changement de direction du courant suffira pour obtenir une rotation inverse.

Transmission de la force. — La transmission de la force entre l'induit du moteur et l'essieu de la voiture se fait, par engrenages ou directement.

La transmission par engrenages peut elle-même se faire par double réduction ou par simple réduction de vitesse.

Avec la double réduction, on peut obtenir des dynamos marchant à grande vitesse (1 000 à 1 200 tours), et par conséquent légères; mais le bénéfice obtenu est absorbé par l'augmentation de résistance, causée par les frottements des engrenages réducteurs de vitesse. Le rendement aux jantes des roues, avec cette disposition, ne dépasse guère 60 p. 100.

On n'emploie plus aujourd'hui, surtout pour la traction électrique par trolley, que des moteurs à simple réduction de vitesse. Dans ces conditions, la vitesse de l'induit doit être réduite à 500 ou 600 tours par minute. Pour obtenir cette réduction de vitesse, il faut, ainsi que l'indique la formule (4) donnée précédemment, $N = \frac{e}{n\Phi}$, que le champ magnétique augmente. C'est pour cela qu'on emploie le plus souvent des moteurs à plusieurs inducteurs et par suite à plusieurs pôles ; nous en donnons quelques exemples. Le rendement aux jantes atteint 75 p. 100 à pleine charge.

La figure 62 représente l'électro-moteur Thomson-Houston. Nous citerons encore des moteurs où l'induit agit directement sur l'essieu, sans intermédiaire d'aucun engrenage. Le moteur Short est un type de ce genre. L'induit est calé sur un tube concentrique à l'essieu qui tourne dans des paliers fixés sur le bâti des inducteurs, suspendu lui-même au châssis avec interposition de ressorts. Ce tube concentrique porte un induit en anneau qui tourne dans un système inducteur à six pôles et les enroulements inducteurs sont placés autour de 3 de ces pôles. Le rendement de ces moteurs est, paraît-il, très élevé.

Afin d'éviter les inconvénients résultant de la boue et de la poussière, les moteurs sont toujours enveloppés dans une caisse

en fonte pouvant s'ouvrir, pour permettre la visite des différents organes de la dynamo. De même, pour éviter le bruit résultant du mouvement des engrenages, ces derniers trempent dans un bain d'huile qui sert en même temps au graissage.

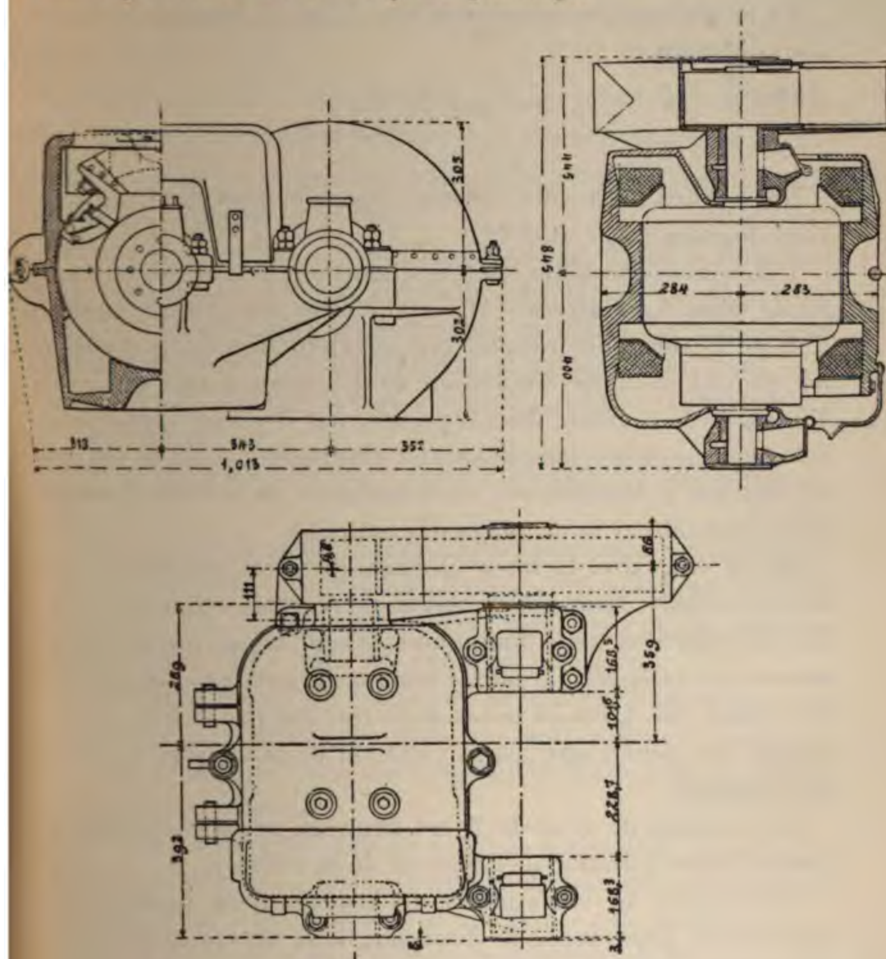


Fig. 62. — Electromoteur Thomson-Houston.

Quel que soit le type de moteur employé, celui-ci doit être robuste, afin de pouvoir résister aux efforts variables résultant du trafic et du profil de la ligne ; léger, afin de ne pas trop surcharger le poids de la voiture ; enfin, peu volumineux, dans le but d'occuper le moins de place possible.

Variation de la vitesse et de l'effort. — Il nous reste à examiner les moyens dont on peut disposer pour faire varier dans le moteur de la voiture, l'effort et la vitesse, suivant le profil de la ligne et les besoins du trafic.

En combinant les deux équations (3) et (4) données plus haut, nous obtenons :

$$N = \frac{E - Ri}{n\mathcal{H}}$$

Nous avons dans cette équation quatre valeurs dont nous pouvons disposer : E, i, R et $\mathcal{H}$.

1° Les trois premières sont fonction l'une de l'autre, suivant la loi de Ohm. La résistance R restant constante, toute augmentation de E aura pour résultat une augmentation de i, c'est-à-dire du courant, et toute diminution de E amènera une diminution d'intensité de courant ; dans le premier cas il y aura augmentation du couple moteur, dans le second diminution. C'est le cas de la traction par accumulateurs, où la variation de la force électromotrice s'obtient par le couplage des batteries.

Si, au contraire, la force électromotrice est constante et que R soit variable, toute augmentation de résistance diminue l'intensité du courant et toute diminution de cette même résistance augmente cette intensité ; le couple moteur variera donc, comme dans le premier cas. C'est ici le cas de la traction par trolley, avec fils aériens ou souterrains, où la variation de la résistance s'obtient par rhéostats.

La variation de E et de R est donc un premier moyen pour obtenir la modification de l'effort et de la vitesse.

Le rhéostat ou la variation de E permettent également, au moment du démarrage, de diminuer, dans une forte proportion, l'intensité du courant qui, sans cela, serait très grande et capable de détériorer les bobines de l'induit. En effet, nous voyons par la formule (3) $i = \frac{E - e}{R}$ que l'intensité du courant dépend de la force contre-électromotrice produite ; or, au moment du démarrage, où la vitesse de rotation du moteur est nulle, cette force contre-électromotrice est également nulle, et par conséquent i est maximum.

On peut aussi, lorsqu'il y a deux moteurs sur la voiture, obtenir

les variations de vitesse et d'effort en modifiant l'accouplement de ces moteurs.

Lorsque ces moteurs sont en quantité, chacun reçoit la différence de potentiel entre les bornes, et le courant qui traverse les induits résulte de l'équation : $I = \frac{2(E - e)}{R}$; R étant la résistance intérieure du moteur.

Lorsque les moteurs sont en série, chacun reçoit la moitié de la différence de potentiel aux bornes, et le courant résulte de l'équation : $I = \frac{E - e}{2R}$; il sera inférieur à celui actionnant les moteurs, lorsque ceux-ci sont en quantité.

On pourra donc, au moment du démarrage, mettre les moteurs en série, et si, de plus, une résistance variable est intercalée dans le courant, on obtiendra un démarrage excellent. La suppression successive de la résistance accélérera la vitesse des moteurs, et la mise en quantité de ces mêmes moteurs permettra l'augmentation de cette vitesse.

2° Nous pouvons aussi faire varier l'intensité du champ magnétique.

Toute augmentation du champ magnétique diminuera la vitesse, toute diminution de celui-ci l'augmentera ; cette action sur le champ magnétique doit toutefois être limitée, surtout en ce qui concerne sa diminution, afin d'éviter les étincelles aux balais.

Nous obtiendrons cette variation du champ magnétique, soit en shuntant les inducteurs, dans le cas de moteurs excités en série, soit en installant des rhéostats sur les fils de ceux-ci, dans le cas de moteurs shunts.

Tels sont les trois moyens qui sont à la disposition du constructeur pour modifier les efforts à produire. Ils sont presque toujours combinés, dans le but d'obtenir le résultat le plus avantageux, et c'est le *coupleur* [1] qui a pour mission de permettre de faire ces différentes combinaisons, suivant les besoins. Ce coupleur, qui a ordinairement la forme cylindrique et qui doit être manœuvré par le conducteur, « le wattman », comme on l'appelle généralement, au moyen d'une simple manivelle, se place à l'avant de la voiture, et est muni d'une série de contacts permettant d'envoyer le cou-

[1] Contrôleur, commutateur, régulateur.

rant, soit dans les moteurs couplés en série ou en quantité, soit dans les enroulements shunts ou les rhéostats des inducteurs. Afin d'éviter le retournement des voitures aux points terminus de la ligne, on place quelquefois un coupleur à l'avant et un autre à l'arrière de la voiture. On a soin de ne disposer que d'une seule manivelle de manœuvre, que l'on ne peut retirer d'un coupleur qu'après avoir préalablement placé celui-ci à sa position de repos. La manivelle unique empêche la manœuvre simultanée des deux appareils, manœuvre, qui provoquerait des courts-circuits.

La disposition des coupleurs est très variable et dépend des différentes combinaisons à obtenir. Les types sont donc très nombreux, et les décrire nous obligerait à sortir du cadre que nous nous sommes imposé. Les principes qui servent de base à leur construction, et que nous venons d'indiquer, permettront toutefois de se rendre compte de leur fonctionnement dans les différents cas d'application.

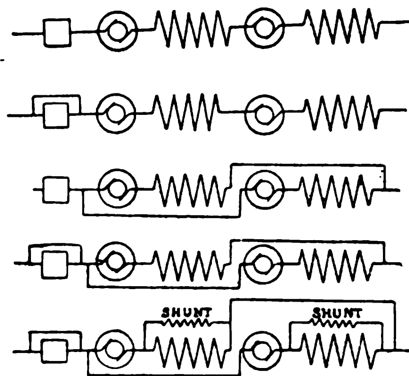


Fig. 62 *bis*.

Avant de terminer, nous indiquerons cependant une combinaison assez fréquemment employée pour les voitures à deux moteurs, et qui permet d'obtenir une assez grande échelle de variation de vitesse (fig. 62 *bis*).

1° Les deux moteurs sont en série avec une résistance variable pour le démarrage.

2° Les deux moteurs sont en série avec suppression de la résistance.

3° Les deux moteurs sont en quantité avec une résistance variable.

4° Les deux moteurs sont en quantité sans résistance, ce qui donne la vitesse normale.

5° Enfin, les deux moteurs restent en quantité en shuntant les inducteurs, ce qui donne la vitesse maximum.

Nous donnons cet exemple parce qu'il est d'un emploi assez fréquent sur les voitures à traction électrique par trolley, mais,

comme nous l'avons dit, on peut imaginer un grand nombre d'autres combinaisons qui dépendent du constructeur.

Les rhéostats, qui constituent les résistances dont nous venons de parler, sont presque toujours formés avec des fils de maillechort, ou quelquefois par des rubans en fer isolés au moyen d'amiante, et aussi par des résistances liquides.

Les voitures à conducteurs aériens sont en outre munies de différents appareils de sécurité :

1° De *parafoudres*, ayant pour but d'empêcher les décharges atmosphériques, lorsqu'elles viennent à tomber sur les fils, de pénétrer dans la voiture ;

2° De *coupe-circuits*, qui doivent empêcher un courant trop intense de traverser le moteur, lorsque l'effort à produire devient lui-même trop grand.

Ces coupe-circuits sont composés de fils de plomb ou de cuivre qui se fondent lorsque l'intensité du courant dépasse une certaine limite, fixée d'avance.

RÉCUPÉRATION

Lorsqu'une voiture d'un poids P remonte une rampe p, le travail nécessaire pour lui faire franchir cette rampe de longueur l, en admettant un coefficient de résistance r, aux bornes du moteur, sera :

$$T = P\,(p + r)\,l.$$

Lorsque la voiture descendra la même pente, en supposant que celle-ci soit supérieure à la résistance r, la voiture prendra une vitesse accélérée, et les freins seront nécessaires pour régulariser la vitesse et absorber une partie du travail de la gravité.

On s'est demandé si, au lieu de dépenser ce travail en pure perte par les freins, il ne serait pas possible de l'employer pour récupérer une partie de l'énergie dépensée en montant la rampe.

Le travail dont on peut disposer en descendant la pente est :

$$T' = P\,(p - r)\,l$$

mais, comme les accumulateurs ne restituent que 70 p. 100 de l'énergie accumulée, le travail disponible sera seulement :

$$T = 0{,}70\,(p - r)\,l.$$

Le rapport entre le travail disponible aux bornes et récupéré pendant la descente, au travail absorbé à la montée, sera :

$$R = 0{,}70\,\frac{p - r}{p + r} \qquad (1)$$

C'est ce que M. Sarcia, dans son intéressant mémoire sur la récupération, publié dans l'*Industrie Électrique*[1], appelle le *coefficient de récupération.*

La formule montre que ce coefficient augmente avec *p*, c'est-à-dire avec la pente, et que la récupération sera d'autant plus grande que celle-ci sera plus forte. Ainsi, en admettant une résistance moyenne de 13,5 kg. par tonne, qui est celle que nous avons admise pour les voies à ornière, on aura évidemment une récupération nulle sur les pentes de 13,5 mm., mais sur les pentes de 50 mm. qui représentent le maximum que nous avons admis, cette récupération sera de :

$$0{,}70\,\frac{50 - 13{,}5}{50 + 13{,}5} = 0{,}402, \text{ soit } 40 \text{ p. } 100.$$

La même formule montre que R augmente à mesure que *r*, c'est-à-dire le coefficient de résistance, diminue. Ainsi, sur une pente de 50 mm. avec un coefficient de 13,5 m. on aura : $R = 0{,}70\,\frac{50 - 13{,}5}{50 + 13{,}5} = 0{,}402$, comme ci-dessus; avec un coefficient de résistance de 10 kg. ce coefficient R deviendra :

$$R = 0{,}70\,\frac{50 - 10}{50 + 10} = 0{,}466 \text{ soit } 47 \text{ p. } 100.$$

On voit donc combien, dans ce cas, il est utile de réduire, autant que possible, les résistances passives des véhicules.

Ces résultats sont intéressants, mais ils sont théoriques, et nous verrons plus loin qu'ils doivent être réduits dans une forte proportion.

[1] Numéro du 10 décembre 1895.

Comment peut-on obtenir pratiquement cette récupération de l'énergie? Le moyen tout indiqué est de se servir de la dynamo motrice, en la transformant dans les pentes en dynamo génératrice, et en lui faisant envoyer dans les accumulateurs le courant produit par cette transformation. C'est le système indiqué par Reynier et qui a été employé sur les nouvelles voitures de tramways de la ligne « Saint-Denis-Opéra-La Madeleine », de la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine.

Nous allons en indiquer le principe.

Contrairement à ce qui se fait pour les tramways à traction électrique, les deux moteurs ont dû être montés en dérivation, et sont d'ailleurs groupés en quantité.

Soit (fig. 63) une batterie d'accumulateurs B, un induit M et un inducteur I. En marche normale, en palier ou en rampe, le moteur M fonctionne comme récepteur et le courant suit la direction indiquée par les flèches; un courant i traverse les inducteurs et un courant I la dynamo réceptrice. Deux rhéostats sont placés, l'un r sur le fil de l'inducteur, et l'autre R sur le fil de la machine motrice.

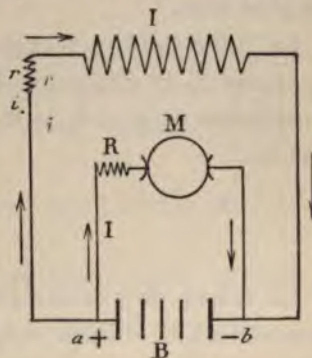


Fig. 63.

Au moment du départ, le courant I traverse la résistance créée par le rhéostat R, tandis que le courant i ne traverse pas le rhéostat r. Pendant le démarrage le conducteur supprime successivement, au moyen du coupleur, les résistances créées par le rhéostat R, et la machine motrice M démarre, puis accélère sa vitesse. A partir de ce moment et pendant toute la durée de la marche normale, il n'aura plus qu'à agir sur le rhéostat R, afin de régler la consommation d'énergie nécessaire à la mise en marche de la voiture.

Si le conducteur veut modifier la vitesse, il devra agir, au moyen du coupleur, sur le rhéostat r, en l'introduisant dans le circuit. Cette nouvelle résistance diminuera l'intensité du courant i, augmentera celle de I, en même temps que le champ magnétique est diminué. Il en résultera une augmentation de vitesse du

moteur, augmentation de vitesse qui pourra atteindre 16 kilomètres à l'heure, lorsque toute la résistance du rhéostat *r* sera introduite.

Pour diminuer la vitesse, au contraire, le conducteur n'aura qu'à manœuvrer le coupleur en sens inverse; il supprimera successivement les éléments du rhéostat *r*, et introduira ensuite ceux du rhéostat R.

Ce fonctionnement est celui qui a lieu en palier, sur une rampe ou sur une pente inférieure à celle correspondant au coefficient de résistance. Que va-t-il se passer sur une pente supérieure à ce coefficient?

Supposons qu'aucune modification ne soit apportée à la position du coupleur, et il ne doit en fait y en avoir aucune. La voiture va accélérer sa marche, et par suite la dynamo va tourner de plus en plus vite.

La force contre-électromotrice *e* va augmenter, et si nous appelons E la différence du potentiel aux bornes de la batterie, c'est-à-dire en *a* et *b*, et R la résistance du circuit *a*, M, B, nous aurons :

$$I = \frac{E - e}{R}$$

La valeur de *e* croissant, celle de I diminuera, et il arrivera un moment où la voiture, accélérant sa vitesse, $E = e$; le courant I sera alors devenu nul, et la dynamo M ainsi que la batterie B seront toutes les deux génératrices, en produisant la différence du potentiel E qui engendre le courant *i* dans les inducteurs.

Si la vitesse de la voiture continue à croître, *e* croissant toujours également, la machine motrice devient génératrice, en envoyant un courant qui se bifurque en *a*, l'un *i* celui qui traverse le fil inducteur, et l'autre $I - i$ qui aura pour effet de recharger la batterie. Comme *e* devient plus grand que E, le courant inducteur augmente un peu, ce qui renforce le champ et permet à la machine de fournir un courant de charge plus grand encore.

Le courant dans le fil inducteur ne sera pas changé; le champ magnétique sera donc le même. Si la dynamo réceptrice avait été montée en série, le courant dans l'inducteur eût été renversé et il

eût fallu renverser les pôles; c'est ce qui explique la nécessité de l'emploi d'une dynamo montée en dérivation.

Sous l'influence de cette énergie qui va s'accumuler dans la batterie, la vitesse de la voiture deviendra très sensiblement constante en descendant la pente. Si toutefois, en descendant cette pente, on voulait modifier la vitesse, rien ne l'empêcherait; il suffirait pour cela de changer un peu l'excitation des inducteurs, en manœuvrant le coupleur, comme nous l'avons indiqué plus haut.

Nous avons donné précédemment la valeur du *coefficient de récupération*, et nous avons dit que ce coefficient devait subir une certaine réduction. En effet, il faut tenir compte :

1° De ce que le travail disponible à la jante :

$$P(p - r) l,$$

doit être affecté d'un coefficient tenant compte des arrêts, ralentissements, etc. On estime que ce coefficient doit être de 0,85;

2° Du rendement des dynamos qui travaillent comme génératrices; soit 75 p. 100;

3° Du rendement des accumulateurs, que nous savons être de 70 p. 100;

4° Du rendement des moteurs lorsqu'ils restituent le travail emmagasiné, soit 75 p. 100.

Le rendement définitif sera donc :

$$0,85 \times 0,75 \times 0,70 \times 0,75 = 0,33.$$

Le travail restitué et disponible à la jante ne sera donc réellement que de : $0,33\ P\ (p - r)\ l$, et le coefficient de récupération sera de :

$$0,33 \frac{p - r}{p + r}.$$

Des expériences ont été faites sur le tramway de la Madeleine à Saint-Denis, notamment sur les pentes de la rue de Rome et de l'avenue de Saint-Ouen. Les résultats sont représentés sur la figure 64, qui donne en watts-heure le travail dépensé et restitué; les rampes sont d'environ 35 mm.

Dans l'avenue de Saint-Ouen, le travail récupéré représente 39 p. 100 du courant dépensé, et dans la rue de Rome 34 p. 100. Comme il y aura une perte de 30 p. 100 lorsque ce travail sera utilisé sur une nouvelle rampe, l'énergie électrique réellement

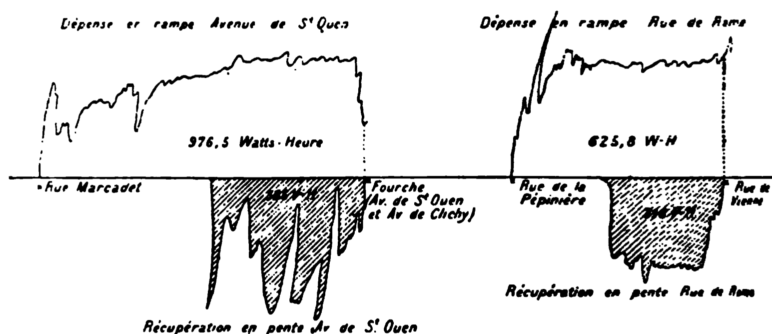


Fig. 64.

récupérée sera : dans le premier cas de 27 p. 100, et dans le second de 24 p. 100.

La récupération offre donc un certain avantage, puisqu'elle permet de diminuer encore les frais de traction du système par accumulateurs, mais il ne faut pas oublier qu'elle n'est possible que sur des lignes accidentées, et ce cas ne se présente pas toujours. L'emploi de cette méthode est donc limité.

SYSTÈME DE TRACTION MIXTE

PAR ACCUMULATEURS ET TROLLEYS

Nous venons de dire qu'il était possible, avec la traction par accumulateurs, de diminuer dans une certaine mesure, par la récupération, la consommation d'énergie électrique nécessaire pour un parcours donné ; mais nous avons vu aussi que cet avantage ne pouvait s'obtenir que sur des lignes à profil assez accidenté, et que, par conséquent, cette méthode ne pourrait être d'un usage général. Dans le même ordre d'idées, et dans le même but, on a songé à un système de traction mixte, en alliant la traction par accumulateurs à celle par trolleys.

Ce système trouve son application toute naturelle, en employant l'accumulateur dans les parties de lignes où il y a lieu de tenir compte des questions d'esthétique, et le trolley dans les autres parties, soit urbaines, soit suburbaines. Les tramways de la « Madeleine-Opéra-Saint-Denis », « Madeleine-Courbevoie-Levallois-Perret », sont dans ce cas; on pourrait en citer beaucoup d'autres exemples [1].

Le système mixte a été appliqué pendant ces temps derniers à deux lignes de tramways, l'une à Dresde, de 4 km. de longueur, et l'autre à Hanovre, de 7 km. de longueur. Quelle sera l'économie obtenue par ce système ?

Soit (fig. 65) une ligne de tramways A B de longueur L, dont une section m L est exploitée par trolleys, et l'autre section n L par accumulateurs.

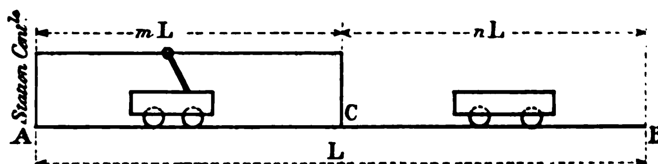


Fig. 65.

Soit : P = poids de la voiture, p = poids de l'accumulateur, r = coefficient de résistance.

L'énergie à dépenser pour parcourir la distance A B aller et retour, sera, en partant de la station centrale :

Section AC (trolley) : $T = (P + p)\, rmL$ (aller).

— CB (accumulateur) : $T' = \dfrac{(P + p)\, rnL}{0{,}70}$ (aller).

— CB (accumulateur) : $T'' = \dfrac{(P + p)\, rnL}{0{,}70}$ (retour).

— CA (trolley) : $T''' = (P + p)\, rmL$ (retour).

L'énergie totale dépensée sera :

$$T + T' + T'' + T''' = (P + p)\, 2rmL + \frac{(P + p)\, 2rnL}{0{,}70}.$$

L'usine centrale a à fournir directement pour le trolley l'énergie dépensée et représentée par le premier membre de l'équation ;

[1] Voir note page 139.

au retour, elle devra fournir aux accumulateurs l'énergie dépensé et représentée par le deuxième terme de l'équation, et, comme rendement des accumulateurs en énergie est de 0,70, elle devi fournir à ceux-ci :

$$\frac{(P + p)\, 2rnL}{0{,}70 \times 0{,}70}.$$

L'énergie totale que la station centrale devra fournir sera donc

$$(P + p)\, 2rmL + \frac{(P + p)\, 2rnL}{0{,}70 \times 0{,}70} = \mathcal{C} = (P + p)\, 2rL \left[m + \frac{n}{0{,}49}\right]$$

Si la traction avait été faite sur tout le parcours avec les acc mulateurs seuls, l'énergie dépensée aurait été :

$$T = \frac{(P + p)\, 2rL}{0{,}70};$$

et l'énergie à fournir par la station centrale aurait été :

$$\mathcal{C}' = \frac{(P + p)\, 2rL}{0{,}70 \times 0{,}70}.$$

L'économie réalisée par l'emploi du trolley, sur une partie m L parcours, est donc :

$$E = (P + p)\, 2rL \left[\frac{1}{0{,}49} - \left(m + \frac{n}{0{,}49}\right)\right] = (P + p)\, 2rL \left(\frac{1 - 0{,}49\, m - n}{0{,}49}\right.$$

et le rapport entre l'économie obtenue par le système mixte et travail qui eût été dépensé par le système à accumulateurs se sera :

$$\frac{E}{\mathcal{C}'} = 1 - 0{,}49\, m - n$$

Évidemment l'économie sera nulle lorsque $n = 1$, puisque $m =$ et que toute la traction se fera par accumulateurs.

Elle sera au contraire maximum, lorsque $m = 1$ et $n = 0$, c'est dire lorsque toute la traction se fera par trolleys. Dans ce cas no aurons donc $\frac{E}{\mathcal{C}'} = 0{,}51$; ce qui indique que, théoriquement, dépense d'énergie du système de traction par trolleys est 0,49 celle nécessaire pour la traction par accumulateurs.

L'économie variera donc entre ces deux limites, et si la lig

est divisée en deux parties égales et que $m = n = 0{,}50$, on aura :

$$\frac{E}{\mathcal{C}} = 1{,}00 - 0{,}49 \times 0{,}50 - 0{,}50 = 0{,}26$$

Ce système mixte aurait pu être appliqué sur la ligne de la Madeleine à Saint-Denis, en faisant la traction par accumulateurs dans l'intérieur de Paris, et par trolleys en dehors. Cela aurait permis de diminuer le poids des batteries, d'autant plus que la récupération était possible pour la partie de la ligne située dans l'intérieur de Paris, qui a un profil accidenté. Le rechargement de la batterie aurait même peut-être pu se faire par le fil du trolley pendant le parcours aller et retour, en dehors de Paris, en évitant ainsi le changement de batterie et en régularisant le fonctionnement de la dynamo génératrice installée à l'usine de Saint-Denis, par la suppression des variations brusques de charge.

Ce système aurait eu, il est vrai, l'inconvénient résultant de l'emploi d'une dynamo sur la voiture avec enroulement des inducteurs en dérivation, nécessité par la récupération, disposition moins avantageuse que l'enroulement en série, pour le fonctionnement par trolleys.

En résumé, ce système de traction mixte mérite toute l'attention et est, croyons-nous, appelé à un certain avenir.

TRAMWAYS DE PARIS A SAINT-DENIS

Description du matériel. — Nous avons dit, au début, que la Compagnie des Tramways de Paris et du département de la Seine avait fait une application du système de traction par accumulateurs sur la ligne de Saint-Denis à l'Opéra ; nous allons donc décrire cette installation, faite en 1893, et nous décrirons ensuite les modifications apportées à cette installation primitive, qui sont actuellement en cours d'exécution.

Installation de 1893. — Les lignes en exploitation sont au nombre de trois : 1° Madeleine-Saint-Denis ; 2° Opéra-Saint-Denis ; 3° Saint-Denis-Neuilly.

La longueur des deux premières est d'environ 9 250 m. chacune,

dont la moitié à peu près à l'intérieur de Paris; les rampes atteignent une inclinaison de 38 mm. par mètre à certains endroits, notamment dans la rue de Maubeuge, dans la rue de Rome et dans l'avenue de Saint-Ouen.

La longueur de la troisième ligne, celle de Saint-Denis à Neuilly, est de 6 km. environ ; elle est tout entière en dehors de Paris; les rampes y sont faibles et de peu de longueur.

Quant aux rayons des courbes, ils descendent jusqu'à 20 m. en certains endroits.

La voie en dehors de Paris est en rails saillants, type Vignole, posés en accotement; dans l'intérieur de Paris la voie est à ornière, du type Broca.

La résistance moyenne à la traction, pour toute la ligne, peut être admise de 12 kg. par tonne remorquée; elle serait même inférieure à ce chiffre, d'après des expériences récentes de M. Sarcia.

Les vitesses de marche maxima sont de 12 km. à l'heure dans Paris et de 16 km. à l'heure à l'extérieur.

Les voitures sont à impériale couverte et contiennent 24 places d'impériale, 20 places à l'intérieur et 6 places de plate-forme, plus le conducteur et le wattman, soit 52 personnes. Quatre lampes à incandescence, alimentées par les accumulateurs, servent à l'éclairage. Le poids de ces voitures peut se décomposer ainsi :

Voiture à vide	7 500 kg.
Batterie d'accumulateurs	3 000 —
Voyageurs	3 500 —
Total	14 000 kg.

La caisse de la voiture est reliée, au moyen de chevilles ouvrières, à deux trucks à un essieu, du type Averly, sur lesquels elle repose au moyen de galets. Un système d'articulation à ressort relie ces deux trucks et permet la convergence des essieux dans les courbes.

Une dynamo à double réduction de vitesse (double harnais) actionne chacun des essieux. Cette dynamo est bipolaire du type Manchester ; l'induit est du système Gramme et l'excitation est faite en série. Les balais sont en charbon, sans angle de calage. A la vitesse de rotation de 1 350 tours par minute de l'induit, qui est la vitesse normale, avec tous les accumulateurs en tension produi-

sant 200 volts et un débit moyen de 2,5 amp. par kilogramme de plaque, soit un débit total de 2,5 × 22 (poids d'un élément) = 55 amp., la puissance produite par les dynamos est de $\frac{55 \times 200}{736}$ = 14,94 chev. Le rapport des vitesses angulaires du moteur et de l'essieu est de 12 à 1. Les engrenages réducteurs sont chevronnés et baignent dans l'huile pour éviter le bruit. Le tout est enfermé dans une caisse métallique, dans le but de mettre l'appareil moteur à l'abri de la poussière et de la boue.

Les accumulateurs sont placés sous les banquettes de la voiture. Ils étaient primitivement du type Laurent-Cély à pastilles, mais, depuis la première installation, différents types ont été essayés, et nous avons indiqué, dans le chapitre précédent, les différentes modifications qui ont été successivement apportées. La batterie se compose de 108 éléments de 11 plaques chacun, contenus dans des bacs en ébonite. Les plaques ont une largeur de 0,200 m. et une hauteur de 0,200 m.

Ces 108 éléments sont groupés dans 12 caisses contenant chacune 9 éléments ; 6 caisses sont placées sous une des banquettes de la voiture ; les six autres sous l'autre. Les 9 éléments qui composent chaque caisse sont groupés en tension, et les pôles de ces batteries élémentaires ainsi formées viennent aboutir à une bande de cuivre fixée sur l'une des parois latérales de la voiture.

On monte à ressort dans la voiture des lames de laiton qui, par l'introduction des caisses entre ces lames, établissent automatiquement la liaison électrique de tous les éléments de la batterie. Ce système de liaison est très simple en principe ; mais il entraîne un grand nombre de connexions qui demandent beaucoup d'entretien.

Le poids de chaque élément est de 22 kg. et sa capacité est en moyenne de 13 ampères-heure, avec un débit moyen de 2 à 2,5 ampères par kilogramme. Sous une force électromotrice de 200 volts, ces batteries peuvent fournir momentanément un débit de 80 ampères, soit 4 ampères par kilogramme, et vont même jusqu'à 120 ampères, soit 6 ampères par kilogramme. Comme nous l'avons montré précédemment, ces batteries peuvent, avant rechargement, avec un débit moyen de 2 ampères, avoir une durée de 5 1/2 h. et suffire à un parcours de 57 km. Elles sont donc suffisantes pour fournir six courses sans rechargement.

C'est ainsi qu'on opérait jusqu'à ces derniers temps ; mais actuellement chaque voiture a sa batterie changée après un voyage aller et retour, c'est-à-dire après un parcours d'environ 18.5 km., au lieu de 37. La batterie ne se trouve donc épuisée qu'au tiers environ, et son rechargement n'exige que 2 heures au plus, au lieu de 5 heures lorsqu'elle est complètement épuisée. Cette nouvelle disposition augmente évidemment les manœuvres de manutention et la main-d'œuvre, mais les plaques sont moins fatiguées.

La batterie est chargée avec tous ses éléments en tension. Pendant cette charge, elle est placée sur des bancs formés de madriers goudronnés, supportés par des piliers en briques avec isolateurs en verre. Les bancs sont munis de contacts à ressort comme pour les voitures.

Chaque banc de charge est relié au tableau de distribution du courant par un circuit sur lequel sont installés les différents appareils nécessaires pour constater l'intensité de ce courant, sa force électromotrice et sa direction.

La disposition du dépôt n'a pas permis de placer ces bancs de chargement le long des voies sur lesquelles pénètrent les voitures qui viennent charger leurs batteries. On est donc obligé d'amener ces batteries, des bancs de chargement aux voitures, au moyen de wagonnets roulant sur des voies Decauville, munies de plaques tournantes et reliant les bancs avec les voies de garage.

Les wagonnets ont une plate-forme mobile sur laquelle repose la caisse des accumulateurs, et qui peut, à l'aide d'une vis, être élevée ou abaissée, afin de l'amener exactement au niveau de la place que cette caisse doit occuper dans la voiture.

Ce système de chargement est long et coûteux ; il faut environ 6 hommes et de 5 à 6 minutes pour charger une voiture. Nous indiquerons plus loin les modifications qui viennent d'être faites par la Compagnie, pour éviter cette manutention.

Les efforts et les vitesses étant variables suivant le profil de la ligne, nous allons indiquer comment on obtient ces variations.

Nous dirons tout d'abord que les deux moteurs de la voiture sont montés en série ; ils peuvent être montés en quantité, mais ce n'est qu'exceptionnellement, dans le but d'obtenir une très grande

vitesse. Un commutateur spécial permet de faire ce changement.

Rappelons aussi que le changement de marche de l'avant à l'arrière, ou réciproquement, s'obtient en inversant le sens du courant dans les inducteurs du moteur ; un commutateur spécial permet également de faire ce changement.

Quant aux variations de vitesse, on les obtient au moyen d'un troisième commutateur et du couplage de la batterie.

Nous avons dit que la batterie se composait de 12 caisses contenant chacune 9 éléments et que ces éléments, groupés en tension, donnaient une force électromotrice de $9 \times 1{,}85 = 16{,}65$ volts. On a réuni ensemble trois de ces caisses, en les groupant en tension avec une force électromotrice de $16{,}65 \times 3 = 50$ volts. Les douze caisses qui forment la batterie entière constituent donc quatre sous-batteries, ayant chacune une force électromotrice de 50 volts, qui peuvent être groupées ensemble, de manière à produire une force électromotrice croissante et, par conséquent, une variation de vitesse. Ces combinaisons sont les suivantes :

1° Les quatre sous-batteries sont en quantité avec une force électromotrice de 50 volts ; c'est le cas du démarrage ;

2° Deux groupes de deux sous-batteries en tension sont mis en quantité ; la force électromotrice sera de 100 volts ; la vitesse aura doublé ;

3° Les quatre sous-batteries sont mises en tension donnant une force électromotrice de 200 volts ; la vitesse aura encore doublé ;

4° Enfin, si on veut augmenter exceptionnellement la vitesse, on pourra mettre les deux moteurs en quantité, ce qui doublera la force électromotrice à leurs bornes.

La charge des batteries se fait, au dépôt de Saint-Denis, comme nous l'avons indiqué. Le courant est fourni par des dynamos Desroziers actionnées par des machines horizontales Corliss ; à la vitesse de 600 tours, chaque dynamo produit 230 ampères sous 260 volts, et la puissance de la machine Corliss qui les actionne est de 125 chevaux.

La charge se fait à potentiel constant, mais en deux parties, comme nous l'avons dit, afin d'éviter un trop grand débit au commencement. Quand la première partie de la charge est terminée, on ajoute à la dynamo de charge une deuxième machine montée

en tension avec elle et qui porte le nom de ***survolteur.*** une augmentation brusque du voltage de charge, a montre le graphique, figure 59.

Après épuisement complet, la durée de charge des ba de cinq heures, mais, par suite du changement des batt chaque voyage aller et retour, une durée de charge de d environ est maintenant suffisante pour remplacer l'éne sée dans le parcours.

En examinant cette installation de 1893, il y a plusie ques à faire :

1° Par suite de la disposition de l'usine et de celle de en 12 caisses séparées, le chargement et le déchargem batteries dans les voitures exigent une manutention coûteuse ;

2° Les plaques positives, qui étaient du type Laurent-(tilles, ne pouvaient effectuer qu'un parcours de 14 000 k

3° Le poids des accumulateurs représente 22 p. 10(total de la voiture ; c'est un poids supplémentaire à rem grève dans une assez grande proportion les frais de trac

4° Les moteurs des voitures sont à double harnais, traîne une perte de force assez grande et diminue le rend jantes qui est au plus de 60 p. 100, à pleine charge, tan moteurs à simple harnais, semblables à ceux employ traction par trolley, rendent 75 p. 100.

Ces différentes considérations ont conduit la Compa dier plusieurs modifications, ayant pour but d'améliorer l nement, tout en diminuant les frais de traction. Ce so difications, introduites dans les nouvelles voitures qu d'être mises en circulation, que nous allons décrire.

Avant de commencer cette description, il nous paraît de calculer le rendement total de l'installation, c'est-à-d port entre le travail indiqué dans les cylindres des r vapeur de l'usine et celui utilisé à la jante des roues de Ce rendement total se compose :

1° Du rendement des machines à vapeur, des transr des dynamos génératrices de charge. Ce rendement peut à 0,65, d'après les différentes expériences qui ont été fa

2° Du rendement des accumulateurs en énergie, soit 0,70 ;

3° Du rendement des moteurs des voitures, qui, comme nous l'avons vu, est égal à 0,60.

Le rendement total sera donc :

$$0,65 \times 0,70 \times 0,60 = 0,27$$

Nouvelle installation — Sauf quelques détails, la caisse des nouvelles voitures est la même que celle des anciennes ; le nombre de places est encore de 50 ; seulement le truck Averly a été supprimé et remplacé par deux essieux fixes à écartement de 2,10 m. Cette dernière modification a permis de diminuer, dans une notable proportion, le poids des voitures proprement dites.

Ce poids peut se décomposer comme il suit :

Voiture	6 500 kg.
Batterie	2 700 —
Voyageurs	3 500 —
Total	12 700 kg.

soit les 0,87 du poids des anciennes voitures.

La batterie d'accumulateurs, formée de 12 caisses, au lieu d'être, comme primitivement, placée sous les banquettes, est installée dans une caisse unique suspendue à la voiture entre les deux essieux. Cette batterie se compose de 108 éléments de 11 plaques, ayant 0,30 m. de hauteur et 0,10 m. de largeur. Ces éléments sont tous en tension et leur groupement ne peut pas être modifié pendant le parcours. La force électromotrice est donc de $108 \times 1,85 = 200$ volts. Le poids d'un élément est d'environ 17,5 kg., et la capacité totale, par kilogramme, de 13 ampères avec un débit moyen de 4 ampères, pouvant varier exceptionnellement jusqu'à un maximum de 12 ampères.

Cette batterie, dont le poids total est de 2 200 kg. environ et le poids des plaques de $17,5 \times 108 = 1\,890$ kg., emmagasine une énergie utilisable de :

$$0,7 \times 13 \times 17,5 \times 108 \times 3\,600 \times 1,85 = 114\,545\,340 \text{ watts},$$

pouvant suffire à un parcours de :

$$\frac{114\,545\,340}{9,8 \times 258\,000} = 45,2 \text{ km.}$$

en admettant les mêmes chiffres que précédemment.

Le rechargement est fait après un voyage aller et retour, c'est-à-dire après un parcours moyen de 18,50 km. ; la batterie a dépensé moins de la moitié de son énergie. Ce poids de batterie n'est que les : $\frac{2\,200}{3\,000} = 0,73$ du poids de la première et vient en déduction du poids à remorquer. Le poids de la batterie n'est plus que les 0,18 du poids de la voiture, au lieu des 0,22.

Son nouvel emplacement sous le véhicule, entre les essieux, enlève toute crainte de projection des acides dans la voiture et supprime également les mauvaises odeurs.

Les manœuvres pour le changement des batteries, longues et coûteuses, comme nous l'avons dit, dans la première installation, sont ici très simplifiées. La voiture est amenée sur une voie de garage à fosse ; un chariot vide, composé d'une plate-forme basse montée sur des roues de petit diamètre et mobile à l'aide d'une vis et d'un volant, afin de l'amener au niveau convenable, est placé sous la voiture et reçoit la batterie épuisée ; un second chariot identique, sur la plate-forme duquel a été placée une batterie nouvellement chargée, est placé de l'autre côté de la voie de garage. On le fait avancer comme le premier sous le véhicule et la nouvelle batterie vient prendre la place de l'ancienne. Quant à la batterie déchargée, on la laisse sur son chariot près de la voie de garage et le rechargement s'opère au moyen de fils volants amenant le courant de charge du tableau de distribution.

Ce changement de batteries ne demande que deux hommes et dure de deux à trois minutes, au lieu de six hommes et cinq à six minutes dans l'installation primitive ; les deux hommes pourraient même être le conducteur et le wattman.

Les connexions se font automatiquement, au moyen de ressorts appuyant sur des bandes de cuivre fixes, et des taquets assurent la fixité de la caisse des accumulateurs.

Ces accumulateurs sont composés de plaques du type que nous avons décrit précédemment ; nous n'y reviendrons donc pas.

Les deux moteurs, conçus par M. Johannet, qui actionnent les essieux des voitures sont plus puissants et plus robustes que ceux des premières voitures. Ce sont des dynamos à induit Gramme, du type supérieur ; ils sont installés horizontalement avec simple engrenage réduisant la vitesse dans le rapport de 4,85 à 1 (fig. 66).

Leur vitesse angulaire normale est de 500 à 600 tours par minute ; les inducteurs ont été calculés en conséquence.

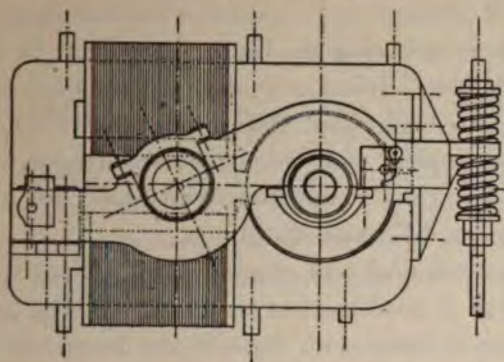


Fig. 66. — Electro-moteur des tramways de Paris-Saint-Denis.

Au débit moyen de 4 ampères, que nous avons indiqué plus haut, soit $17,5 \times 4 = 70$ ampères et à la pression de 200 volts, ces dynamos peuvent développer :

$$\frac{70 \times 200}{736} = 19 \text{ chev.}$$

Leur rendement peut atteindre 75 p. 100, au lieu de 60 p. 100 au maximum, dans le type à double harnais. Comme l'indique la figure 66, le moteur est suspendu à l'arrière de la caisse au moyen de ressorts, et le centre de gravité de l'ensemble se trouvant à très peu de distance en arrière de l'essieu, il en résulte que le poids des moteurs, soit 2 t., repose presque en entier sur les essieux.

La question de la suspension des moteurs est très importante, et l'idéal serait un moteur entièrement suspendu à la caisse et ne laissant porter sur l'essieu que le poids le plus faible possible. C'est un fait reconnu depuis longtemps par les constructeurs, mais d'une réalisation difficile.

Toute augmentation de poids sur l'essieu a pour conséquence une augmentation de résistance par tonne de voiture. Ce fait a été mis en évidence par de récentes expériences faites sur le tramway de Saint-Denis-Opéra. C'est sur les fusées de l'essieu, par l'intermédiaire des ressorts, que doit être reporté, autant que cela est possible, le poids des moteurs, et non sur l'essieu lui-même.

Les deux moteurs sont montés en quantité et excités en dérivation ; la mise en quantité a été faite, dans le but de se servir de ceux-ci pour le freinage de la voiture et l'excitation en dérivation, en vue de la récupération de l'énergie pendant la descente des pentes, comme nous l'avons indiqué plus haut. Dans ce même chapitre relatif à la récupération, nous avons montré le mode de fonctionnement du coupleur pour obtenir les démarrages, les variations de vitesse et les arrêts ; nous renvoyons donc nos lecteurs à ce chapitre, pour ces différentes questions.

Les modifications dont nous venons de parler ont amélioré deux choses : d'abord le rendement et ensuite les frais de traction ; examinons d'abord le rendement. Nous avons donné tout à l'heure le rendement de l'installation de 1893, qui était de 27 p. 100 ; dans la nouvelle installation le rendement :

1° Des moteurs des voitures, a été porté de 60 p. 100 à 75 p. 100 ;

2° Le rendement en énergie des accumulateurs est resté le même, soit 70 p. 100 ;

3° Le rendement des machines à vapeur, des transmissions et des dynamos génératrices, qui est actuellement de 65 p. 100, est faible et peut, par des modifications dans le matériel fixe, être porté à 80 p. 100. Le rendement total sera donc de :

$$0,80 \times 0,70 \times 0,75 = 0,41$$

au lieu de 0,27.

Ce rendement est un maximum, car il suppose que les moteurs des voitures travaillent à pleine charge ; dans tous les cas, il sera toujours très sensiblement supérieur au rendement primitif.

Quelle sera l'amélioration au point de vue des frais de traction ?

D'après les renseignements fournis par M. Sarcia, les frais de traction par kilomètre-voiture, avec l'installation primitive, se décomposent ainsi qu'il suit :

Entretien et manutention des accumulateurs.	0,16 fr.	main-d'œuvre. 0,06 fr. entretien . . . 0,10 —
Force motrice.	0,18 —	
Entretien des trucks et des moteurs.	0,05 —	
Wattman	0,08 —	
Total	0,47 fr.	

Par suite des différentes améliorations qui viennent d'être apportées, on estime que le prix de traction par kilomètre-voiture sera de :

Entretien et manutention des accumulateurs . . .	0,10 fr.
Force motrice	0,13 —
Entretien des trucks et des moteurs	0,03 —
Wattman	0,08 —
Total	0,34 fr.

La Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine a traité, avec la Compagnie de traction et d'électricité, pour un prix ferme de 0,40 fr.

CONSOMMATION DE CHARBON ET TRAVAIL PAR KILOMÈTRE-VOITURE

1° *Installation de* 1893. — La résistance totale moyenne par tonne peut être estimée pour les lignes de Paris à Saint-Denis à 12 kg. ; le poids des voitures étant de 14 t., le travail en chevaux par kilomètre-voiture sera de :

$$\frac{14 \times 12 \times 1\,000}{0,27 \times 270\,000} = 2,3 \text{ chev.};$$

ce qui, avec une consommation de charbon de 1,20 kg. par cheval, chiffre résultant des essais, donne une consommation de charbon par kilomètre-voiture de :

$$2,30 \times 1,20 = 2,76 \text{ kg.}$$

2° *Nouvelle installation.* — Le poids des nouvelles voitures étant de 12,7 t. et le rendement de 0,41, le travail en chevaux par kilomètre-voiture sera :

$$\frac{12,7 \times 12 \times 1\,000}{0,41 \times 270\,000} = 1,38 \text{ chev.};$$

ce qui représente une consommation de charbon de :

$$1,38 \times 1,20 = 1,66 \text{ kg.}$$

DÉPENSE EN WATTS-HEURE PAR KILOMÈTRE-VOITURE

La dépense que nous allons indiquer est celle relative à la première installation, la seule dont nous connaissons les résultats d'une manière suffisamment précise. Des relevés nombreux et exacts ont permis de constater que chaque voiture consomme en moyenne 47 à 55 ampères-heure (aux bornes de la voiture), pour une course aller et retour entre la Madeleine ou l'Opéra et Saint-Denis. La distance totale parcourue, y compris les manœuvres aux deux extrémités de la ligne, étant de 19 km., la dépense en watts-heure par kilomètre-voiture sera de :

$$\frac{55 \times 210}{19} = 608 \text{ watts-heure, soit } \frac{608}{735} = 0{,}83 \text{ chev.},$$

la force électromotrice étant de 210 volts.

A cette dépense correspond une résistance moyenne par tonne de :

$$\frac{608 \times 0{,}60 \times 3\,600}{9{,}81 \times 14 \times 1\,000} = 9{,}6 \text{ kg.}$$

TRAMWAYS DE LA MADELEINE-LEVALLOIS-COURBEVOIE-NEUILLY

Ce réseau appartient à la Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine et se compose de trois lignes partant de la Madeleine. La première, d'une longueur de 6,9 km., relie la Madeleine à Courbevoie-Neuilly ; la seconde, de 5,3 km., relie la Madeleine avec Courbevoie (place Victor-Hugo) et la troisième, plus courte et d'une longueur de 4,9 hm., se termine à Levallois à l'extrémité de la rue de Courcelles, sur le bord de la Seine. L'ensemble de ces lignes constitue donc un réseau de 17,1 kilomètres de longueur.

Le profil en long de ces lignes, quoique peu accidenté, présente cependant à l'aller la rampe du boulevard Malesherbes, qui a près de 900 m. de longueur en rampe continue de 0,016. De même au retour, l'avenue de Villiers présente une rampe de 950 m. environ de longueur avec une inclinaison de 0,010 à 0,012.

La traction se fait par accumulateurs, comme sur celle de l'Opéra à Saint-Denis, mais ici le mode de rechargement des accumulateurs est tout différent et c'est en cela que réside la nouveauté du système.

Les accumulateurs sont installés à poste fixe dans les voitures, et, à chacun des points terminus, après chaque voyage aller et retour, ces accumulateurs, qui sont reliés à l'aide de feeders avec les dynamos génératrices de l'usine centrale, sont rechargés pendant la durée du stationnement des voitures, c'est-à-dire pendant dix minutes environ. La manutention nécessitée par le changement des batteries, comme cela se fait sur la ligne de l'Opéra à Saint-Denis, se trouve donc ici supprimée.

Nous allons décrire brièvement l'installation de ces lignes.

L'usine centrale est placée à Puteaux, sur le quai National, au bord de la Seine, ce qui facilite l'approvisionnement en charbon et en eau.

Dans cette usine centrale, se trouvent : une grande remise pour les voitures, un atelier de réparation, les chaudières, les machines à vapeur et les dynamos qui doivent produire l'énergie électrique nécessaire aux trois lignes.

Les chaudières se composent de trois générateurs multitubulaires Babcock et Wilcox timbrés à 16 kg. et munis d'un économiseur, pour le réchauffage de l'eau d'alimentation ; chaque chaudière peut produire 1 800 kg. de vapeur par heure.

Les machines à vapeur sont au nombre de trois, du type Willans et Robinson, à triple expansion. Ces machines développent chacune 200 chev. avec une vitesse de 460 tours par minute ; elles peuvent marcher soit à condensation, soit avec échappement à l'air libre.

Chacune des machines à vapeur actionne directement une dynamo Brown à quatre pôles avec excitation shunt, calage fixe et balais en charbon. Chaque dynamo marchant à 460 tours peut fournir 200 ampères sous 600 ou 660 volts, soit environ 120 kilowatts.

Comme l'indique la figure 67, la dynamo est fixée sur le même bâti que la machine à vapeur. Comme il est impossible de soumettre la marche des voitures à un horaire absolument fixe, on a

prévu la possibilité de charger simultanément une, deux, trois ou quatre voitures. La charge d'une voiture débutant souvent avec un courant de 175 amp., l'à-coup donné aux machines serait trop considérable; on a donc prévu l'installation d'une batterie « volant » permettant de parer à cette mise en charge normale.

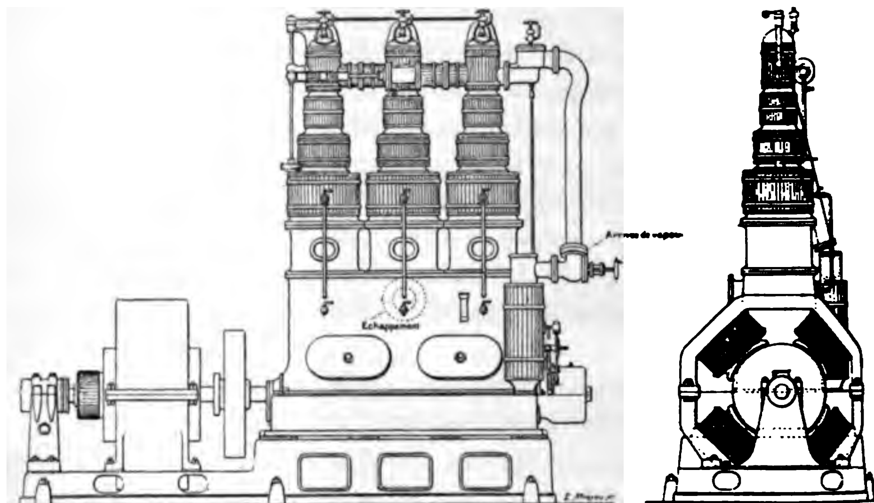


Fig. 67. — Machine à vapeur Willans et dynamo Brown.

La batterie « volant » est constituée par 3 batteries de voitures mises en quantité, au-dessus desquelles se trouvent placés en série cent éléments Tudor, avec réducteur, pour le réglage de la tension. On peut ainsi faire fonctionner, à charge presque constante, les génératrices.

Les feeders qui relient le tableau de distribution de l'usine centrale avec chacun des points terminus des trois lignes, sont au nombre de trois.

Le premier, qui n'a qu'une très courte longueur, relie l'usine centrale avec les postes de charge de Courbevoie-Neuilly; il a une section de 150 mm².

Le second, d'une longueur de 2 km., relie l'usine centrale avec le point terminus de la ligne de Courbevoie (place Victor-Hugo); sa section est également de 150 mm².

Enfin le troisième, qui se termine au bord de la Seine à

Levallois, a une longueur de 3,5 km. et une section de 250 mm².

La résistance de ces feeders est calculée de manière à avoir pour chacun une même perte de potentiel de 10 à 12 p. 100. Le voltage, aux postes de charge des voitures, peut donc varier entre 534 et 587 volts.

Les câbles sont placés en terre et sont formés d'une âme en cuivre rouge, isolée au moyen d'une couche de jute imprégné et d'un ruban enduit. Une double gaine de plomb entoure le câble et le soustrait à l'action de l'humidité ; une armature de fer feuillard, recouvert d'un enduit préservatif, enveloppe le tout.

Les postes de charge, installés aux points terminus de chaque ligne où vient aboutir le feeder qui doit alimenter les voitures de cette ligne, ont extérieurement la forme des avertisseurs d'incendie (fig. 68). A la partie supérieure de cette colonne se trouvent une boîte qui contient la prise du courant et un appareil qui prévient le wattman, à l'aide d'une sonnerie, que sa batterie est chargée. On établit la liaison entre la colonne de prise de courant et les accumulateurs de la voiture au moyen d'un câble souple à deux conducteurs. Des marques différentes sont faites à l'extrémité de chacun des conducteurs de ce câble de liaison, afin de faciliter les connexions et d'éviter les interversions de courant.


Fig. 68. — Poste de charge.

La figure 69 représente la voiture. Elle est à impériale couverte et contient 50 places, plus le conducteur et le wattman, soit en tout 52 personnes. Son poids en ordre de marche est de 14 t. La caisse repose sur un truck au moyen de six ressorts, quatre à lames placés aux extrémités du truck et deux à volute placés au milieu de celui-ci.

Le truck représenté par la figure 70 repose, par l'intermédiaire

de deux ressorts à lames, sur deux essieux espacés seulement de 1,90 m., afin de faciliter le passage dans les courbes de petit rayon. Chaque essieu est mis en mouvement par une dynamo à quatre pôles et balais en charbon, d'une puissance normale de 15 chev. et de 25 chev. au maximum. Cette dynamo est enveloppée, comme d'habitude, dans une caisse en fonte qui la met à l'abri de la boue et de la poussière; on peut visiter sans difficulté les balais et vérifier leur calage, en ouvrant une trappe ménagée à la partie supérieure de la caisse. Ces dynamos sont à simple réduction de vitesse et les engrenages trempent dans un bain d'huile.

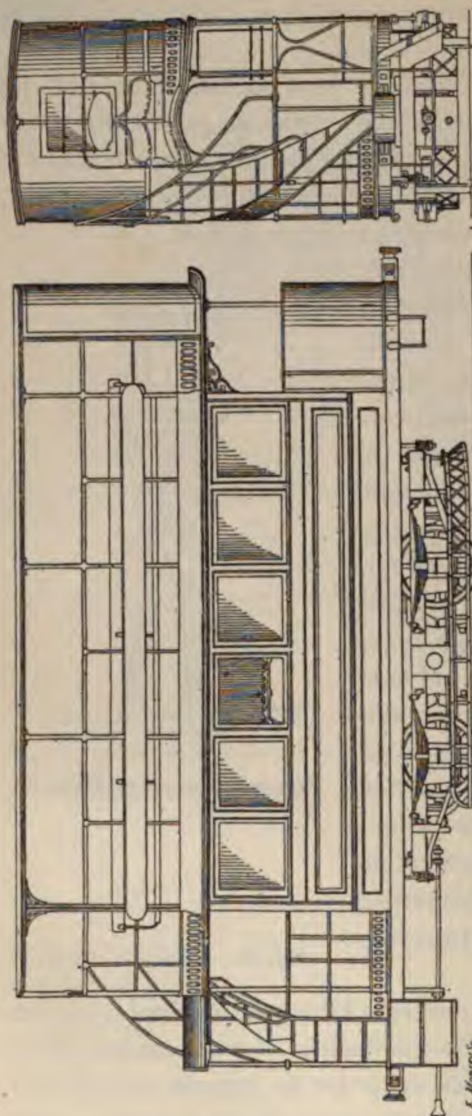


Fig. 69. — Automotrice des tramways de la Madeleine-Courbevoie.

Une sablière est installée sur le truck, dans le but d'éviter les patinages, aux démarrages, dans les temps humides.

Les accumulateurs sont disposés sous les banquettes, et afin d'empêcher la détérioration des bois par suite des émanations acides provenant de la batterie, on a revêtu le plancher et les parois d'un vernis à base de caoutchouc; des trous ont de plus

été ménagés dans le plancher pour permettre l'écoulement de l'acide qui, par suite d'un arrêt trop brusque, pourrait être projeté hors de la batterie. Enfin, pour éliminer pendant la charge les émanations acides, on a installé sous les banquettes une petite dynamo qui actionne un ventilateur.

Ces accumulateurs sont du type *Tudor*, dont nous avons parlé

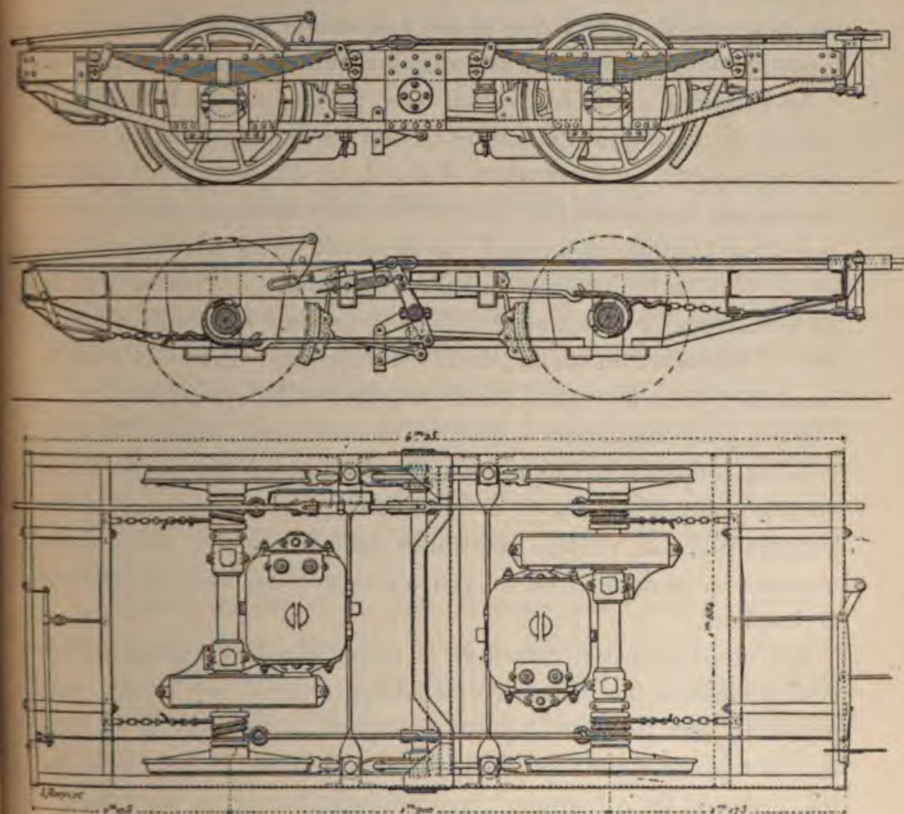


Fig. 70. — Truck des automotrices des tramways de la Madeleine-Courbevoie.

précédemment; ils se composent de 200 éléments de 0,23 m. de longueur et de 0,34 m. de hauteur pesant, en plomb, 13 kg. par élément et 18 kg. avec les accessoires. Le poids actif de la batterie est donc de 2600 kg. et le poids total de 3 600 kg.

Les éléments se composent de 5 plaques, 3 négatives, formation Faure, et 2 positives, formation Planté, reposant sur des semelles

isolantes en ébonite dans des bacs également en ébonite. Ces éléments sont installés à poste fixe sous les banquettes, en quatre rangées de 50 éléments et sont toujours chargés et déchargés en série, sans aucun couplage.

La charge se fait à la voiture avec un voltage, à fin de charge, de 2,7 volts par élément, soit un potentiel total de 540 volts. La décharge commence avec 2,05 volts par élément et finit avec 1,90 volts, soit une moyenne de 1,98 volts, ce qui donne une force électromotrice totale de $1,98 \times 200 = 396$ volts, soit 400 volts en chiffres ronds.

Le coupleur prend le courant aux bornes de la batterie. On obtient les variations du couple moteur et de la vitesse au moyen de ce coupleur, en intercalant d'abord au démarrage un rhéostat liquide sur le courant qui agit sur les deux moteurs mis en série; ce rhéostat liquide est formé d'une électrode en plomb qui peut s'enfoncer plus ou moins dans un bain de carbonate de soude. A la fin du démarrage ce rhéostat liquide est supprimé et remplacé par un second rhéostat en métal, dont on supprime successivement la résistance jusqu'à ce que l'on ait obtenu la vitesse normale.

Puis, pour augmenter la vitesse, on continue à tourner la manivelle du coupleur, ce qui a pour effet de shunter une partie des inducteurs des dynamos et de diminuer, par conséquent, le flux magnétique. La vitesse maximum est obtenue en couplant les moteurs en parallèle, au moyen d'un coupleur spécial placé sur le coupleur.

Les mouvements inverses de la manivelle du coupleur produisent également des effets inverses dans la vitesse, et, lorsque cette manivelle sera revenue au point de départ, si on continue à la tourner on enroulera sur l'axe du contrôleur une chaîne qui actionnera les cordes du frein Lemoine, en produisant le serrage des sabots.

La marche avant et arrière s'obtient au moyen d'un coupleur spécial.

On a installé sur la plate-forme de la voiture un commutateur qui a pour but de mettre la batterie en communication, soit avec le coupleur, soit avec les bornes du poste de charge. On évite ainsi de mettre en marche par erreur, lorsque les accumulateurs sont en charge, ce qui pourrait arriver dans le cas où la batterie serait en communication permanente avec le coupleur. Un

second coupleur, placé à côté du premier, sur la plate-forme, permet également de supprimer l'une ou l'autre des demi-batteries, en cas d'avarie.

La voiture est éclairée par six lampes à incandescence en série; mais la tension de charge de la batterie étant supérieure à celle qui circule habituellement dans les lampes, il y aurait à craindre que ces dernières ne soient brûlées pendant la charge; pour éviter cet inconvénient on intercale, pendant cette opération, deux nouvelles lampes qu'on retire immédiatement du circuit après la charge.

RENSEIGNEMENTS TECHNIQUES

Les lignes dont nous venons de parler sont ouvertes depuis trop peu de temps pour qu'il soit possible de donner des résultats complets et surtout définitifs. Nous pouvons dire seulement que, d'après les renseignements que nous avons pu recueillir et qui résultent d'expériences, la dépense en énergie par kilomètre-voiture est d'environ 770 watts-heure à l'usine centrale de Puteaux, et de 550 watts-heure[1] aux bornes de la voiture, ce qui correspond à un rendement en énergie de 70 p. 100 pour les accumulateurs.

La force électromotrice des éléments étant, au début de la décharge, de 2,05 volts, et à la fin, de 1,90 volts, soit en moyenne de 1,98 volts, la force électromotrice totale des accumulateurs sera : $200 \times 1,98 = 396$ volts, soit 400 volts. La dépense moyenne en ampères-heure par kilomètre-voiture sera donc : $\frac{550}{400} = 1,37$,

[1] Il est intéressant de se rendre compte de la résistance moyenne par tonne correspondant à ce travail ; nous aurons :

$$\frac{550 \times 3\,600 \times 0,70}{9,8 \times 14 \times 1\,000} = 10,1 \text{ kg.}$$

Ce chiffre est faible, mais il faut se rappeler que la ligne n'a que de très faibles rampes et qu'une partie importante de sa longueur est en rails saillants, ce qui diminue beaucoup la résistance.

De plus, nous avons admis le poids de 14 tonnes pour la voiture, ce qui suppose que les voyageurs sont au complet, ce qui ne doit évidemment pas avoir lieu pour une circulation moyenne. En admettant une charge moyenne correspondant à un poids de 12,2 t., la résistance serait de 11,66 kg.

et pour les 14 km. de parcours, aller et retour, entre Courbe
et la Madeleine, de :

$$1,37 \times 14 = 19,18 \text{ amp., soit } 20 \text{ amp.-h.}$$

Or la capacité garantie étant, paraît-il, de 55 amp.-h., s
$\frac{55}{13} = 4,2$ amp.-h. par kilogramme de plaque, il en résulte
la dépense pour un voyage aller et retour ne sera q
$\frac{20}{55} = 38,5$ p. 100 de la capacité utilisable garantie.

Le nombre d'ampères à restituer dans les accumulateurs
voitures, après chaque voyage aller et retour, en supposant le
dement en quantité de 0,85, sera de : $\frac{20 \times 3600}{0,85} = 84,708$ a
La charge se fait avec un voltage de 600 volts à l'usine et
perte variant de 10 à 12 p. 100 dans les feeders, soit un voltage
voiture de 534 volts au minimum. L'intensité du courant, au d
de la charge, est d'environ 200 amp., soit $\frac{200}{13} = 15,4$ amp.
kilog. de plaque, et à la fin de 100 amp., soit $\frac{100}{13} = 7,7$ a
par kilog. de plaque ; l'intensité moyenne du courant est
de 150 amp, soit 11,55 amp. par kilog. de plaque. Pour resti
les 84 708 amp. dans les accumulateurs de la voiture il fa
donc : $\frac{84\,708}{150} = 9', 24''$.

Pratiquement cette durée est de 10 minutes et de 13 au m
mum.

La force motrice moyenne à l'usine, nécessaire pour le rec
gement des accumulateurs, sera :

$$150 \text{ amp.} \times 600 \text{ volts} = 90\,000 \text{ watts};$$

soit, en supposant un rendement moyen de 75 p. 100 entre
bornes des dynamos et les cylindres de la machine à vapeur
travail indiqué de (avec les machines Willans, le rendement
atteindre 80 p. 100) : $\frac{90\,000}{0,75 \times 736} = 163$ chev.

La puissance de chaque machine est de 200 chev.

D'après des expériences récentes, la consommation de cha
par voiture-kilomètre serait de : 2,59 kg.

Le poids total des accumulateurs avec les accessoires es
3 600 kg. et le travail produit par kilomètre-voiture de 550 w

comme nous l'avons indiqué plus haut; c'est donc un poids de 655 kg. par 100 watts-heure. A propos de la traction par accumulateurs sur la ligne de la Madeleine-Opéra-Saint-Denis, nous avons vu que le travail par kilomètre-voiture était de 608 watts avec un poids d'accumulateurs de 3 000 kg.; le poids d'accumulateurs par 100 watts est donc seulement, pour cette ligne, de 193 kg.

Ainsi que nous l'avons dit, la ligne de la Madeleine-Courbevoie-Neuilly est ouverte depuis trop peu de temps pour qu'il soit possible de connaître, avec une certaine exactitude, les dépenses de traction par kilomètre-voiture. Cependant nous savons que le prix à forfait consenti par la Société industrielle des moteurs électriques et à vapeur, pour l'exploitation de cette ligne, est *inférieur* au chiffre de 0,40 fr. qui est celui de la ligne de la Madeleine-Opéra-Saint-Denis.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Nous ne pouvons que rappeler les chiffres donnés précédemment (p. 182 et 183), en faisant remarquer toutefois que ces chiffres ne pourront être obtenus que lorsque les améliorations projetées seront complètement terminées. Nous rappelons également que la Société de Traction a entrepris cette traction, à forfait, pour le prix de 0,40 fr. par kilomètre-voiture.

Force motrice	0,13 fr.
Entretien et manutention des accumulateurs	0,10 —
Entretien des voitures et des moteurs	0,03 —
Wattman	0,08 —
Dépense de traction par kilomètre-voiture	0,34 fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il convient d'ajouter celles qui sont dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction qui, pour une ligne du genre de celle que nous avons considérée, c'est-à-dire d'une longueur de

30 km., ayant 30 voitures, dont 20 en service, parcourant chacun 150 km. par jour, peut s'établir comme il suit :

Générateurs et moteurs, tuyauterie, réservoirs, pompes, etc	250 000 fr.
Dynamos avec leurs transmissions.	80 000 —
60 batteries d'accumulateurs à 4 500 fr. . . .	270 000 —
Outillage des ateliers et accessoires	30 000 —
Bâtiments des dépôts et ateliers.	100 000 —
30 voitures à 18,000 fr	540 000 —
Total.	1 270 000 fr.

Ce qui représente, pour un parcours annuel de 1 000 000 de kilomètres, une dépense de :

$$\frac{1\ 270\ 000 \times 0,1}{1\ 000\ 000} = 0,13 \text{ fr.}$$

La dépense totale par kilomètre-voiture s'élèvera donc à 0,34 fr. + 0,13 = 0,47 fr.

TRAMWAYS A GAZ

L'emploi du gaz d'éclairage pour la traction mécanique des tramways paraît tout indiqué, surtout dans les villes. Là, en effet, le gaz est sous la main, et l'amener aux différents points où l'alimentation des voitures doit se faire est chose facile, les maîtresses conduites existant déjà.

De plus, on peut, par la compression, emmagasiner dans des réservoirs de dimensions moyennes une quantité de gaz suffisante pour le parcours ordinaire des voitures; la compression du gaz dans ces réservoirs à une pression de 10 à 20 kg., qui est celle généralement admise, n'entraîne pas une dépense considérable de force. Tout semble donc à l'avantage de ce mode de traction; pas d'usine productrice de l'énergie à créer, indépendance de la voiture, pas de modifications ni d'additions à apporter à la voie ordinaire des tramvays, sauf quelques bouches de chargement à établir en certains points de la ligne.

Mais, il y a une contre-partie à ces avantages. Les moteurs à gaz ont fait, surtout dans ces dernières années, d'immenses progrès; en même temps que leur rendement mécanique augmentait, la dépense de gaz par cheval diminuait, par suite de l'augmentation de la compression dans le cylindre, permettant une pression initiale plus grande, et aussi par suite de l'emploi de soupapes pour l'introduction du mélange gazeux ou pour son échappement. Les moteurs à quatre temps, type Otto, qui sont, en ce moment, ceux qui donnent les meilleurs résultats, arrivent

à ne consommer que 500 à 600 litres de gaz par cheval, et même moins, si l'on s'en rapporte à certains essais faits récemment avec des moteurs Crossley, où la dépense a été d'environ 400 litres, pour des machines puissantes, il est vrai.

Mais les moteurs à gaz à quatre temps exigent certaines conditions qui ne sont guère compatibles avec la marche ordinaire des tramways, qui doivent prendre des vitesses variables, suivant le tracé et le profil, et qui doivent pouvoir s'arrêter à différents endroits fixes ou même arbitraires.

Avec un moteur à quatre temps, il n'y a qu'une seule explosion pour deux tours de l'arbre moteur ; on se trouve donc obligé, pour obtenir un mouvement de rotation uniforme, d'employer un volant relativement assez lourd et qui prend de la place.

Pour éviter d'augmenter le poids du moteur, on doit lui donner une grande vitesse, et, pour en obtenir de bons résultats, celle-ci doit être aussi constante que possible. Les variations de vitesse, nécessaires aux tramways, ne peuvent donc s'obtenir qu'indirectement et au moyen d'une combinaison d'engrenages.

La nécessité de cette constance de la vitesse du moteur, jointe à la difficulté de la mise en marche, qui ne peut s'obtenir qu'en faisant tourner à la main le volant, oblige de laisser tourner la machine pendant les arrêts momentanés de la voiture. De là, consommation inutile de gaz et trépidations qu'on ne peut diminuer qu'au moyen d'un régulateur qui doit, pendant les arrêts, n'admettre dans le cylindre qu'un mélange gazeux pauvre, tout en diminuant dans une faible mesure la vitesse du moteur.

Les moteurs à gaz actuels ne peuvent marcher que dans un sens, ce qui nécessite, pour la traction des voitures, une nouvelle combinaison cinématique permettant le renversement de la marche.

Enfin, le cylindre moteur a besoin d'être constamment rafraîchi par un courant d'eau, ce qui oblige à avoir un réservoir placé à la partie supérieure du véhicule et une circulation d'eau.

La liaison entre le cylindre moteur et le ou les essieux ne se fera donc plus simplement, comme dans le cas du moteur à vapeur ou à air comprimé; elle exigera des combinaisons cinématiques. un grand nombre d'engrenages et, par conséquent, des pertes de force et un entretien plus grand.

Ce sont les points faibles des tramways à gaz. Néanmoins les constructeurs et les inventeurs ne se sont pas découragés, et différents systèmes ont été étudiés. Sans parler de ceux qui sont restés à l'état de projet et n'ont reçu aucune application, nous citerons la locomotive pour tramways du système Connely, qui, essayée à New-York, Saint-Louis et surtout à Chicago, aux États-Unis, a reçu une application en 1893 sur les lignes de tramways de Greenwich et de Croydon en Angleterre. La force motrice employée est la benzine, l'essence minérale ou le pétrole ; le moteur est à quatre temps[1].

Nous citerons encore le moteur Daimler, qui est aussi à benzine ou à essence et à quatre temps. C'est au moyen de combinaisons d'engrenages qu'on obtient la variation de vitesse et le changement de marche.

Un moteur de six chevaux de ce système a été appliqué à la traction de voitures destinées au service d'une ligne secondaire du réseau des chemins de fer de l'État wurtembergeois. Ces voitures pesaient à vide 3,2 t. et devaient porter 20 voyageurs, 10 debout et 10 assis.

Des voitures plus grandes, pesant 10 t. à vide et contenant 40 places, avec un moteur de 10 chevaux, les ont remplacées. Nous ne savons si ces voitures sont toujours en service ; toujours est-il que c'est sur ce même réseau que vient d'être mise en circulation, et pour un service similaire, la voiture automotrice Serpollet, dont nous avons parlé plus haut.

Des moteurs Daimler ont aussi été appliqués à de petits cars à voie de 0,80 m. à 24 places, destinés à circuler dans le Prater, à Vienne ; les moteurs sont de la force de 4 chevaux.

Nous nous étendrons un peu plus longuement sur le système Lührig, perfectionné par la « Gas Traction C° » de Londres, qui est aujourd'hui propriétaire du brevet, et qui a reçu, depuis 1894, quelques applications à des tramawys urbains et surburbains. Dans ce système, c'est le gaz d'éclairage qui sert de force motrice, et non plus la benzine ou le pétrole, comme dans les deux systèmes précédents.

[1] *Génie civil*, vol. XXVIII, p. 100.

La première application en a été faite à Dresde en 1893 et ensuite à Dessau, près de Berlin, vers la fin de 1894. La voie est à écartement normal de 1,44 m. en rails du type Broca; la rampe maximum est de 48 mm. par mètre et la plus petite courbe a 12 m. de rayon. La vitesse réglementaire est de 12 km. à l'heure ; la longueur de la ligne est de 6,200 km. Les voitures contiennent 12 places assises et 13 places debout; le moteur est du système « Otto », d'une puissance de 7 chevaux. Le poids à vide de cette voiture est de 6,64 t. et en charge de 8,40 t.

La consommation de gaz par kilomètre-voiture est, d'après les renseignements qui ont été fournis par la Compagnie, de 350 à 400 litres, et celle de l'eau pour le refroidissement des cylindres de 100 litres.

A la fin de 1895 la « Gas Traction C° » a mis en exploitation une ligne de tramways de 13 km. de longueur entre Blackpool et Lytham. Les voitures automobiles à gaz de cette nouvelle ligne sont à impériale avec un total de 42 places. Le poids de la voiture à vide est de 7 t. et de 10 t. en charge; le moteur a une puissance de 15 chevaux et la consommation est, paraît-il, de 560 litres par kilomètre-voiture. Les réservoirs ont une capacité de 1 250 litres et la pression dans ces réservoirs est de 10 kg.; la vitesse de marche est de 16 km. à l'heure.

La figure 71 représente la disposition des voitures de la « Gas Traction C° » en service à Dresde, disposition qui est la même, sauf quelques détails, que celles de Blackpool et de Dessau.

Le gaz est emmagasiné dans les réservoirs R à une pression généralement de 10 kg. Un système de tuyaux le conduit de ces réservoirs aux cylindres moteurs, en traversant un détendeur où la pression est réduite à 25 ou 30 mm. d'eau.

En sortant des cylindres les gaz de la combustion se rendent dans des caisses, percées de trous, qui permettent à ceux-ci de se répandre dans l'atmosphère sans bruit, après avoir déposé les impuretés et l'eau qu'ils contenaient.

Le moteur M, placé sur un côté de la voiture, est composé de deux cylindres, en tandem, ayant leurs deux manivelles en prolongement l'une de l'autre; les gaz sont comprimés dans un des cylindres pendant qu'ils sont aspirés dans l'autre, ce qui permet

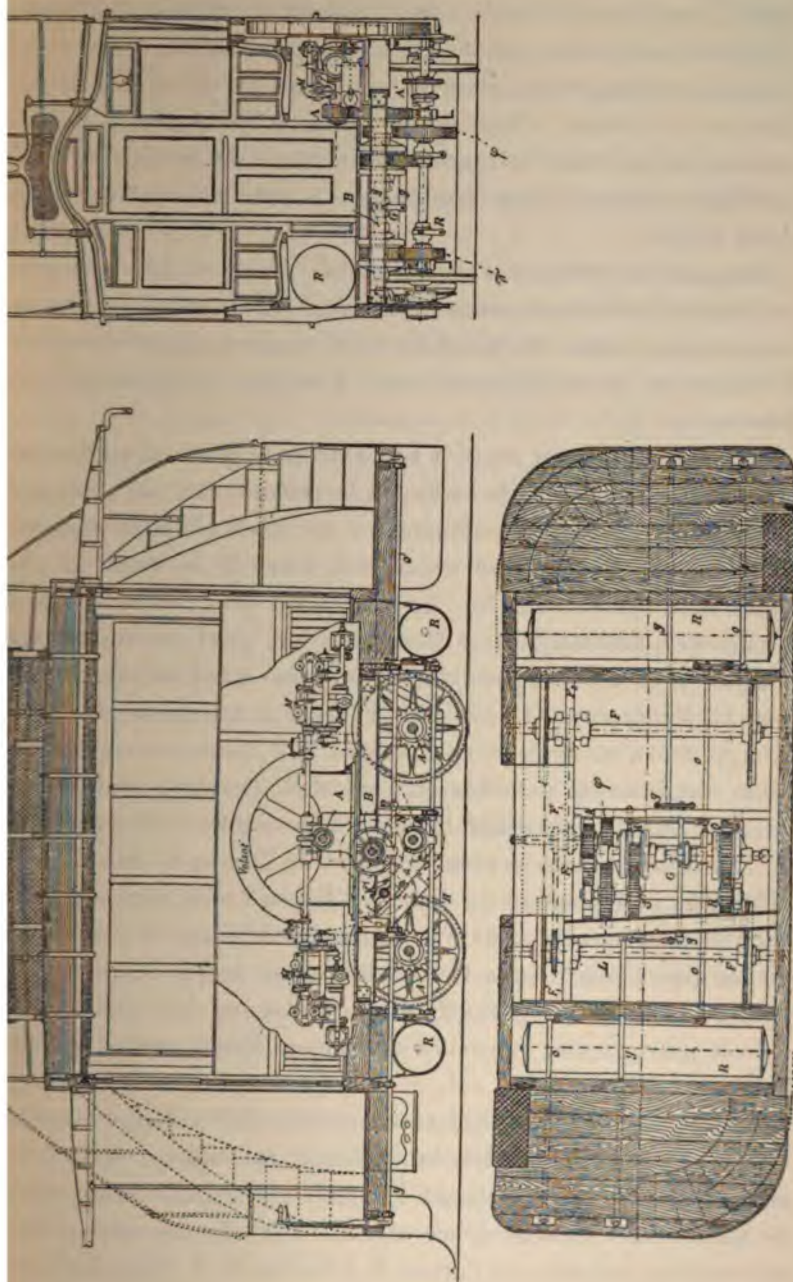


Fig. 71. — Automotrice à gaz des tramways de Dresde.

une explosion par tour de volant. Ces moteurs, du type « Otto » à quatre temps, sont placés sous la banquette disposée de manière à former une caisse étanche, pour garantir les voyageurs contre le bruit et la mauvaise odeur. L'explosion du mélange gazeux est obtenue au moyen d'une petite dynamo actionnée par l'arbre moteur, et, pendant la marche, le réglage de la vitesse est fait par l'intermédiaire d'un régulateur à boules agissant sur la conduite du gaz.

Pendant les arrêts des véhicules où, comme nous l'avons dit, on doit diminuer la consommation et ralentir la vitesse du moteur, une soupape, reliée au levier du frein, ferme en partie l'ouverture d'admission, en ne laissant entrer dans les cylindres qu'un gaz pauvre.

L'arbre moteur est muni à son extrémité d'un volant dissimulé dans une des parois de la caisse de la voiture, et à son autre extrémité d'un engrenage A, commandant l'arbre B placé au-dessous et parallèlement à lui. Sur ce second arbre B se trouvent deux roues H et Q folles sur lui. Au moyen du manchon d'embrayage à plateaux, manœuvré par le conducteur, par l'intermédiaire des tringles *g*, *g*, celui-ci peut mettre en prise avec l'arbre B, soit la roue H, soit la roue Q ; ces deux roues ont un diamètre différent et engrènent avec deux roues dentées J' et R, fixées sur un deuxième arbre auxiliaire K parallèle au second B. On comprend aisément que, par suite de ces différences dans les diamètres des roues H et Q, la machine motrice pourra donner à l'arbre K deux vitesses différentes et dépendant du diamètre de ces roues, tout en conservant la vitesse constante du moteur ; l'embrayage à plateaux qui met en prise, soit la roue H, soit la roue Q, et qui donne un mouvement très doux, permet même d'obtenir des variations de vitesse plus grandes que celles strictement fixées par les diamètres des roues d'engrenage.

En commandant les essieux au moyen d'une chaîne les reliant à l'arbre K, on obtiendra la variation de vitesse. Mais il faut encore obtenir le changement de sens de la marche. Pour cela on se sert d'un troisième arbre auxiliaire N. Le mouvement dans un sens est transmis de l'arbre K à l'arbre N, à l'aide des engrenages, L calé sur l'arbre K et φ monté fou sur l'arbre N. Pour le

sens opposé, le mouvement est transmis par la roue R, calée sur l'arbre K, à la roue π folle sur l'arbre N, au moyen de la roue Q laissée folle sur l'arbre B. Les roues φ et π sont mises en prise avec l'arbre N, au moyen du manchon d'embrayage R, manœuvré par le conducteur à l'aide des tringles O,O.

C'est cet arbre N qui, par des chaînes de Galle, commande les essieux moteurs, en leur donnant une vitesse variable dans un sens ou dans l'autre.

Une dernière condition, indispensable à remplir, est d'empêcher l'action du moteur sur les essieux, au moment où le mécanicien vient à serrer les freins. Cette condition est obtenue au moyen d'un débrayage de l'arbre N, rendant celui-ci indépendant des essieux, obtenu par une combinaison d'arbre et d'engrenages, liés avec le volant de manœuvre du frein.

Lorsque les freins sont serrés, l'arbre N est débrayé et ne peut agir sur les essieux, et, lorsque le conducteur desserre les freins, l'embrayage se produit et l'essieu moteur est mis en mouvement.

Comme on le voit, les conditions à remplir compliquent la transmission de force entre l'appareil moteur et les essieux. Toutefois la manœuvre à faire par le conducteur est en elle-même assez simple.

Au départ, il met en marche le moteur en faisant faire à la main plusieurs tours au volant ; puis il desserre les freins, ce qui, en décalant les roues, embraye le moteur avec les essieux. Il manœuvre ensuite le levier O qui met en prise l'une des roues φ ou π, suivant le sens de la marche qu'il veut obtenir, et auquel il n'aura plus à toucher pendant tout le trajet. Enfin il agit sur le levier *g* mettant en prise soit la roue H, soit la roue Q, suivant la vitesse qu'il désire avoir.

L'eau destinée au refroidissement des cylindres est contenue dans un serpentin d'une contenance d'environ 300 à 350 lit. ; il est composé de deux parties horizontales placées l'une dans la toiture, l'autre au-dessous du plancher. Un tuyau vertical, dans lequel se trouve intercalée l'enveloppe des cylindres, réunit ces deux parties.

Le remplissage des réservoirs des voitures avec le gaz se fait,

soit aux points terminus, soit, comme pour l'air comprimé et les locomotives sans foyer, à des points déterminés et choisis d'avance.

A ces différents points sont installés de petits bâtiments contenant un moteur à gaz du genre « Otto », actionnant un compresseur refoulant le gaz dans des réservoirs, à la pression voulue, c'est-à-dire à une pression variant de 10 à 20 kg. La puissance du moteur est généralement de 8 à 10 chevaux et la contenance des réservoirs dépend évidemment du trafic.

Ces réservoirs sont reliés avec les bouches de chargement au moyen d'une tuyauterie qui ne présente rien de spécial ; un tuyau flexible, vissé sur les bouches de chargement et aux réservoirs, permet le remplissage de ceux-ci. On a pu constater, dans les installations de Dresde et de Dessau, que la quantité de gaz nécessaire pour la mise en marche de ces machines de compression correspond assez exactement au dixième du gaz employé par les moteurs des voitures.

TRAVAIL MOYEN ET DÉPENSE EN GAZ PAR KILOMÈTRE-VOITURE

1° *Automotrice seule.*

Nous prendrons ici comme type, comme nous l'avons fait dans les autres cas, la voiture à 50 places. Cette voiture pourrait peser en charge 12 t. réparties comme il suit :

Châssis et caisse	5 000 kg.
Mécanisme	2 500 —
Réservoirs	1 000 —
Voyageurs	3 500 —
	12 000 kg.

En admettant encore une résistance moyenne par tonne de 17,5 kg., la résistance par kilomètre-voiture sera :

$$12 \times 17,5 \times 1\,000 = 210\,000 \text{ kgm.}$$

ou :

$$\frac{210\,000}{270\,000} = 0,777 \text{ chev.-h.}$$

Etant donnée la grande quantité d'engrenages qui relient l'arbre moteur avec les essieux, le rendement de l'appareil moteur ne sera certainement pas supérieur à 50 p. 100 ; nous aurons donc un nombre de chevaux de :

$$\frac{0{,}777}{0{,}5} = 1{,}55 \text{ chev. à fournir par le moteur.}$$

La consommation de gaz pouvant être admise de 600 lit. par cheval-heure, la consommation par kilomètre-voiture sera :

$$1{,}55 \times 600 = 930 \text{ l.}$$

quantité à laquelle il faudra ajouter 1/10, pour tenir compte du gaz nécessaire pour la mise en marche des machines destinées à la compression. Ce chiffre résulte des observations faites soit à Dresde, soit à Dessau. La consommation totale par kilomètre-voiture sera donc de :

$$930 + 93 = 1\,023 \text{ l.}$$

2° *Automotrice avec une voiture de remorque.*

Le poids de la voiture remorquée étant en charge de 9 t., le travail total à fournir par kilomètre sera de :

$$1{,}55 + \frac{17{,}5 \times 9 \times 1\,000}{270\,000 \times 0{,}5} = 2{,}72 \text{ chev.}$$

ce qui donnera une consommation de gaz de :

$$2{,}72 \times 600 = 1\,632 \text{ l.}$$

plus 1/10, comme nous l'avons dit plus haut, soit au total une consommation de :

$$1\,632 + 163 = 1\,795 \text{ l.}$$

LONGUEUR DU PARCOURS QU'ON POURRAIT OBTENIR

Nous admettrons des réservoirs pouvant contenir 1 500 litres et une pression dans ces réservoirs de 20 kg. La quantité de gaz emmagasiné sera donc de :

$$1\,500 \times 20 = 30\,000 \text{ l. à la pression atmosphérique.}$$

L'automotrice seule pourra parcourir une distance de :

$$\frac{30\,000}{930} = 32{,}2 \text{ km.}$$

L'automotrice, avec la voiture de remorque, pourra parcourir une distance de :

$$\frac{30\,000}{1\,632} = 18{,}4 \text{ km.}$$

TRAVAIL MOYEN A LA VITESSE DE 12 KILOMÈTRES A L'HEURE

Pour l'automotrice seule ce travail sera de :

$$1{,}55 \times 12 = 18{,}60 \text{ chev.}$$

et pour l'automotrice remorquant une voiture, de :

$$2{,}72 \times 12 = 32{,}64 \text{ chev.}$$

TRAVAIL MAXIMUM SUR UNE RAMPE DE 50 MILLIMÈTRES PAR MÈTRE A LA VITESSE DE 5 KILOMÈTRES A L'HEURE

1° *Automotrice seule.*

En admettant une résistance de 13,50 kg. par tonne et un re dement de 0,50, le travail à produire pour l'automotrice seu sera de :

$$\frac{12\ (13{,}5 + 50)\ 1{,}39}{75 \times 0{,}50} = 28{,}4 \text{ chev.}$$

et, pour l'automotrice avec une voiture de remorque, en adm tant une résistance de 8,50 kg. pour cette dernière, de :

$$\frac{[(13{,}50 + 50)\ 12 + (8{,}50 + 50)\ 9]\ 1{,}39}{75 \times 0{,}50} = 47{,}75 \text{ chev.}$$

Ce calcul ne tient pas compte de l'effort à produire aux déma rages qui viendrait en augmentation.

Etant donnée la puissance à produire par les machines et le p d'emplacement dont on dispose au-dessous des banquettes, il

aurait difficulté à produire cette force avec une seule machine à deux cylindres en tandem, comme le type que nous avons décrit. Il serait nécessaire d'avoir deux moteurs, chacun à deux cylindres, installés de chaque côté de la voiture sous les banquettes ; mais alors le poids de la voiture se trouverait sensiblement augmenté. Un type d'automotrice de ce genre a été étudié par la « Gas Traction C° ». La transmission par engrenages, assez compliquée, donnera-t-elle pour ces puissances des résultats aussi favorables que pour des petites forces de 10 à 12 chev. auxquelles elle a été appliquée ? C'est une question que l'expérience seule peut résoudre. Il n'a du reste encore été construit aucune automotrice à gaz de 50 places, devant satisfaire aux conditions du programme que nous nous sommes posé, et qui est celui de la traction mécanique dans une grande ville.

Des moteurs à gaz à deux temps, alimentés par du gaz et de l'air comprimé, mélangés en proportion convenable, et permettant alors l'emploi de tiroirs de distribution, ont bien été étudiés dans ces derniers temps ; mais les résultats n'ont pas encore été suffisamment satisfaisants pour en faire une application pratique dont les résultats seuls pourraient bien faire augurer de l'avenir de ce mode de traction.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Ces dépenses sont difficiles à donner exactement, faute de renseignements, les résultats obtenus sur les quelques lignes en exploitation ou en essai n'ayant pas été publiés. Nous les établirons par comparaison avec la traction par moteurs à vapeur Rowan et Serpollet.

Consommation de gaz (voir p. 203) 1000 l. à 0,20 fr.. . .	0,200 fr.
Huile, graissage et eau.	
La quantité d'eau à fournir pour le refroidissement des cylindres est plus importante que celle nécessaire à la production de vapeur des moteurs Rowan ou Serpollet ; le graissage est également plus important, par suite de la	
A reporter.	0,200 fr.

Report	0,200 fr.
plus grande complication de la transmission de force; nous pouvons admettre	0,025 —
Réparation et entretien du matériel roulant, des moteurs, ateliers, personnel des ateliers et matières premières. . Il y aurait lieu à majoration sur les chiffres admis pour la traction par moteurs à vapeur, étant donnés la plus grande complication du mécanisme et le personnel nécessaire pour les prises de gaz installées en dehors des points terminus; nous admettrons toutefois, cette remarque faite, les mêmes chiffres.	0,110 —
Salaire des mécaniciens.	0,080 —
Divers et imprévus	0,020 —
Dépense de traction par kilomètre-voiture . . .	0,435 fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il faut ajouter celles qui sont dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction, qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 km., ayant 30 voitures dont 20 en service, parcourant chacune 150 km. par jour, peut s'établir comme il suit :

Moteurs à gaz pour prises de gaz en route, tuyauterie, etc.	27 000 fr.
Compresseurs pour prises de gaz en route avec leurs transmissions	25 000 —
Bâtiments des dépôts, ateliers, outillage des ateliers, réservoirs, etc.	200 000 —
30 voitures à 27 000 fr.	810 000 —
Total. . . .	1 062 000 fr.

Ce qui représente, pour un parcours annuel de 1 000 000 de kilomètres, une dépense de :

$$\frac{1\,062\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0,106$$

La dépense totale de traction par kilomètre-voiture s'élèvera donc à : 0,435 fr. + 0,106 fr. = 0,541 fr.

TROISIÈME CLASSE

TRAMWAYS

OÙ

L'ÉNERGIE EST EMPRUNTÉE A UNE USINE CENTRALE

MAIS DISTRIBUÉE AUX VOITURES

AU FUR ET A MESURE DES BESOINS

TRAMWAYS FUNICULAIRES. — TRAMWAYS ÉLECTRIQUES A FIL AÉRIEN

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES A FIL SOUTERRAIN

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES A DISTRIBUTEURS AU NIVEAU DU SOL

TRAMWAYS FUNICULAIRES

Les funiculaires sont de deux espèces :

1° Ceux à *mouvement alternatif*, où la charge descendante entraîne la charge montante, soit par contrepoids d'eau, soit par l'action d'une machine motrice à vapeur, hydraulique ou électrique.

On en trouve de nombreux exemples en France et ailleurs ; mais c'est surtout en Suisse que ce système a pris le plus grand développement, surtout dans ces dernières années. Ce dispositif s'applique plutôt à l'exploitation des plans inclinés à inclinaisons très fortes et de peu de longueur qu'à celui des tramways ; nous ne nous en occuperons donc pas.

2° Ceux à *mouvement continu*, où un câble sans fin, mis en mouvement par une force motrice quelconque, mais en général par une machine à vapeur, remorque des voitures auxquelles on a adapté un appareil permettant la liaison de celles-ci avec le câble.

Ce mode de traction est déjà assez ancien et a reçu ses premières applications, comme traction pour les tramways, aux États-Unis vers 1873, où, depuis, il a pris un grand développement. A la fin de 1894, la longueur totale était de 1 066 km. On le trouve à Pittsburgh, à Chicago, à Saint-Louis, à Cleveland, à New-York, à San Francisco, à Washington. Ce grand développement a amené les ingénieurs américains à faire des études très approfondies sur ce système de traction.

L'Australie nous offre également d'assez nombreuses applications, qui ont même été renouvelées dans ces dernières années.

En France, nous avons à Paris le funiculaire de Belleville qui se trouve dans des conditions d'exploitation très difficiles, par suite de l'obligation d'avoir une voie unique, sauf aux garages, et des courbes d'un très faible rayon. C'est le premier exemple d'un funiculaire dans de pareilles conditions; aussi n'est-il pas surprenant que son exécution ait été difficile et que son exploitation ait été sujette à des ennuis assez nombreux au début.

En Angleterre, nous en trouvons l'application à Highgate-Hill à Londres, à Birmingham et à Edimbourg ; mais il faut surtout citer le Subway de Glasgow qui sert de chemin de fer de ceinture à cette ville et qui vient, tout dernièrement, d'être mis en exploitation. A deux voies, placées dans deux tunnels séparés, il a une longueur de 14 km. environ et les câbles sont mis en mouvement par deux machines à vapeur de 1 500 chev. chacune. Dans cette nouvelle installation, très soigneusement étudiée, on retrouve les perfectionnements des tramways à câble installés dans ces dernières années aux États-Unis.

PRINCIPE DES TRAMWAYS A CABLE

Le tramway funiculaire à câble à traction continue (fig. 72) se compose de deux câbles logés dans des caniveaux souterrains, ou

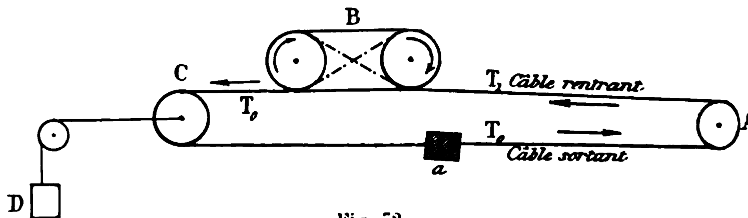


Fig. 72.

placés à la surface du sol, et soutenus par des poulies entre les rails.

Ces deux câbles, en s'enroulant autour de la poulie de retour A, placée à une des extrémités de la ligne, ont un mouvement inverse, qui permet de faire marcher dans un sens ou dans l'autre les véhicules qui lui sont reliés par un moyen quelconque.

En un point de la ligne, mais le plus souvent près de l'extrémité opposée à celle occupée par la poulie de retour A, se trouvent des poulies B mises en mouvement par une machine à vapeur et autour desquelles vient s'enrouler le brin du câble AB qui, pour cette raison, porte le nom de *câble rentrant ;* par suite de cette rotation des poulies motrices B et de l'enroulement du câble autour d'elles, celui-ci se met en mouvement.

A la sortie des poulies motrices, le câble vient passer autour d'une autre poulie C, maintenue par un contrepoids D qui forme ce qu'on appelle le *tendeur*. Le câble se continue ensuite jusqu'à la poulie de retour A, en formant le *câble sortant*. Nous expliquerons tout à l'heure le but du tendeur.

Pour que la rotation des poulies motrices, actionnées par la machine à vapeur et autour desquelles s'enroule le câble, produise le mouvement de ce dernier dans le sens indiqué par les flèches, il faut que, étant donné l'effort de tension T_1, auquel est soumis le câble rentrant et qui dépend des frottements sur les poulies de support et des efforts nécessités par la traction des véhicules, ce câble ne glisse pas sur les poulies motrices, sans quoi il n'y aurait pas d'avancement. Il faut donc qu'il y ait une certaine relation entre la tension du câble rentrant T_1, à son entrée sur les poulies motrices, et la tension T_0 du câble sortant, au moment où il quitte ces poulies.

C'est cette tension T_0 que doit donner le tendeur C.

La relation entre T_1 et T_0 est donnée par la formule suivante :

$$T_1 < T_0 e^{af}; \quad T_0 e^{af} - M = T_1 \qquad (1)$$

dans laquelle :

e est la base des logarithmes népériens ;

a l'angle embrassé par le câble sur la ou les poulies motrices ;

f le coefficient de frottement du câble sur la poulie ;

M est le supplément d'effort qu'on peut faire supporter au brin rentrant avant glissement.

Nous savons de plus que l'effort à produire par la machine à vapeur est :

$$E = T_1 - T_0 \qquad (2)$$

c'est-à-dire la différence de tension entre le brin rentrant et le brin sortant.

Enfin, les expériences faites au tramway de Belleville permettent de trouver une seconde relation entre T_1, et T_0 qui est :

$$T_1 = a + bT_0 \qquad (3)$$

où a et b sont des coefficients qui tiennent compte des résistances dues aux poulies de support, soit d'alignement, soit de courbe, entre le tendeur et la rentrée du brin rentrant sur la poulie motrice.

Cette formule permettra, étant donnés le nombre des poulies, leurs dimensions et leurs poids, ainsi que le nombre des voitures en service, en tenant compte des démarrages et des tensions supplémentaires qui en résultent, de déterminer la tension T_1, que subira le câble rentrant aux poulies motrices, avec une tension admise de T_0 dans le câble sortant.

La valeur ainsi trouvée de T_1 devra satisfaire à l'équation (1). Or dans cette équation nous avons trois valeurs dont nous pouvons disposer : le nombre a, représentant l'angle embrassé par le câble autour des poulies motrices ; le coefficient f de frottement du câble sur la poulie ; enfin la tension T_0 du tendeur, agissant sur le câble sortant. Nous pouvons faire croître la valeur de a, en augmentant le nombre des poulies motrices et en faisant passer le câble successivement autour de ces différentes poulies, comme il est indiqué sur la figure précédente, ou même en les croisant en forme de 8, comme nous l'avons indiqué en pointillé ; cette dernière disposition donne un enroulement plus grand que la première, mais elle déforme davantage le câble.

On fait également croître la valeur de f, c'est-à-dire du coefficient de frottement du câble sur la poulie, en interposant entre le câble et le fond de la gorge de la poulie, soit des cales en cuir, soit des cales en bois ; dans ces conditions, le coefficient varie entre 0,25 et 0,35 et devient plus grand que celui de fer contre fonte.

Ce sont ces deux moyens, l'augmentation du nombre des poulies motrices et l'emploi des cales en bois ou en cuir, qui sont toujours employés pour obtenir la relation indiquée par la formule (1) entre la tension T_1 nécessaire et la tension T_0 qui a été admise, et éviter

le glissement du câble sur les poulies motrices. On pourrait également obtenir le même résultat en augmentant la tension du brin sortant T_0 et, par conséquent, en chargeant le contrepoids C. Mais nous allons voir qu'il y a inconvénient à donner une trop grande tension au câble sortant et qu'il ne faut user de ce moyen que pour lui donner largement, mais sans exagération, la tension suffisante pour la circulation des voitures qu'il doit remorquer.

En combinant les deux équations (1) et (3), on obtient :

$$M = T_0 (e^{af} - b) - a;$$

équation qui montre que, en augmentant la tension du câble sortant T_0, la valeur de M augmente, c'est-à-dire que la charge remorquée pourra être plus grande, ce qui serait évidemment un avantage; mais d'un autre côté, la combinaison des deux équations (2) et (3) donne :

$$E = a + T_0 (b - 1), \qquad (4)$$

qui montre, de son côté, que l'accroissement de T_0 fait croître également dans une grande proportion la force motrice nécessaire pour la propulsion du câble et des voitures.

Il faudrait encore ajouter à cet inconvénient celui d'augmenter la tension T_1 du câble rentrant et, par suite, les frottements sur les poulies de courbe.

Nous avons dit que l'équation (3) permet de déterminer la tension T_1 du brin rentrant, près de la poulie motrice, lorsque la tension du brin sortant T_0 est connue ; mais, pour cela, il faut connaître les coefficients *a* et *b* qui représentent les différents efforts que le câble doit supporter entre le tendeur et la poulie motrice.

Ces différents efforts sont très nombreux et très complexes ; ce sont : 1° les résistances dues au frottement du câble sur les poulies d'alignements droits et sur les poulies de courbes.

Sans développer les formules qui représentent ces résistances, nous pouvons dire que pour les alignements droits elles croissent avec le poids du câble et des poulies, sont en raison inverse du diamètre de celles-ci, et augmentent avec le coefficient de frottement de l'axe de rotation dans son coussinet. Mais cette résistance est indépendante de l'effort de traction du câble.

Il y a donc avantage à avoir des poulies légères et ayant un

rapport aussi grand que possible entre le diamètre de la poulie et celui de l'axe ; ceux-ci doivent être parfaitement graissés et centrés, et le câble lui-même doit être lubrifié suffisamment pour diminuer la résistance dans la gorge de la poulie. Pour les courbes les mêmes conditions doivent être remplies au point de vue du graissage ; mais ici la résistance n'est plus indépendante de la tension du câble ; elle croît avec lui et avec l'angle formé par les deux brins du câble ; il y a donc intérêt à diminuer cet angle en rapprochant les poulies dans les courbes. Malgré tout, ces résistances dans les courbes sont très importantes et peuvent, dans le cas où la ligne est sinueuse, comme au funiculaire de Belleville, absorber une partie considérable de la force motrice.

2° Les résistances dues à la marche des voitures. Celles-ci se composent des résistances dues aux rampes, de celles dues à la marche en palier et en alignement droit et qui s'ajoutent ou se retranchent des premières, suivant le sens de l'inclinaison, et enfin de celles dues aux démarrages.

Les deux premières résistances sont connues et faciles à apprécier ; quant à la troisième, elle est plus compliquée et nécessite quelques explications.

Lorsqu'une voiture est au repos sur le câble rentrant, en rampe, et qu'on veut la mettre en marche, le mécanicien rapproche les mâchoires du grip, sans les serrer à fond contre le câble, afin d'éviter un démarrage trop brusque. Par suite de ce serrage modéré, le câble de traction continue à avancer dans les mâchoires du grip, et lorsque le frottement obtenu est devenu égal ou un peu supérieur à la résistance due à la rampe et à celle due au roulement en palier et alignement droit, la voiture se met en marche. Le câble continuant ensuite à glisser par frottement dans le grip, la voiture est soumise à un mouvement d'accélération, jusqu'à ce que la vitesse de celle-ci ait atteint celle du câble ; à ce moment la vitesse relative entre le câble et la voiture sera nulle et la marche de la voiture deviendra normale. Le travail qui s'est produit pendant cette période sera l'effort dû au démarrage, effort que devra supporter le câble et par suite la machine motrice.

L'effort sera d'autant plus grand et le temps du démarrage d'autant plus court que le frottement dû au serrage du grip sur le câble

sera plus fort. Il faut donc au moment du démarrage serrer légèrement le grip et n'obtenir le serrage à fond qu'au moment où la vitesse normale est atteinte ; c'est ce qui se fait en pratique. Ce travail supplémentaire, dû au démarrage, est considérable et peut atteindre le double de l'effort normal.

Pendant ce travail supplémentaire, le câble de traction subit un allongement élastique en avant de la voiture, et par suite, en arrière de celle-ci le câble se ralentit dans sa marche ; il en est de même du câble sortant jusqu'au tendeur, qui alors s'avance sur la gauche (fig. 72), sous l'effet du contrepoids D.

A la fin du démarrage, l'effort supplémentaire qui lui est dû disparaît, l'allongement élastique du câble en avant de la voiture disparaît également et le tendeur revient alors à droite, en faisant un certain nombre d'oscillations, jusqu'au moment où il a repris son équilibre ; la voiture acquiert à ce moment une petite augmentation de vitesse, presque instantanée.

Si, au lieu d'un démarrage, nous supposons que la voiture abandonne le câble, par suite d'un arrêt, l'allongement élastique en avant du véhicule disparaîtra, le câble se raccourcira et le tendeur sera ramené sur la droite pour reprendre encore son équilibre, après quelques oscillations.

Nous venons d'examiner les effets produits par le mouvement des voitures sur le câble rentrant ; examinons maintenant quels seront ces effets sur le câble sortant qui est en pente.

Une voiture, accrochée au câble sortant en a, produit une traction sur ce câble et par suite diminue la tension T_0 et, par contrecoup, la tension T_1 du câble rentrant, comme l'indique l'équation (3). La force motrice E (équation 4) sera ainsi diminuée, et M, c'est-à-dire le poids remorqué, pourra être plus grand sur le brin montant. Toutes les charges accrochées sur le brin descendant permettent donc d'augmenter celles remorquées sur le câble rentrant.

D'un autre côté, la voiture a accrochée sur le brin sortant tire sur le tendeur C et le ramène sur la droite. Par ce fait, la tension du câble sortant, entre le tendeur et les poulies motrices, diminue. Si cette diminution de tension est faible, l'équilibre se rétablira facilement autour des poulies motrices, et, au bout de quelques oscillations, le tout sera remis dans son état normal. Mais si, au contraire,

la charge sur le câble sortant était assez forte pour entraîner un déplacement assez grand du tendeur, il pourrait se faire que la nouvelle tension T_0 ne soit plus suffisante pour équilibrer la tension T_1 du câble rentrant, et, dans ce cas, il y aurait glissement du câble sur les poulies motrices.

Comme il faut éviter cet inconvénient, il est de toute nécessité de donner au tendeur une surcharge qui dépendra du nombre de voitures qui pourront être accrochées sur le brin sortant. Ce sera sa charge minimum.

Nous avons dit précédemment et donné les raisons pour lesquelles la surcharge du tendeur ne devait pas non plus dépasser un certain poids maximum. La charge des contrepoids à appliquer au tendeur devra donc être comprise entre ces deux limites extrêmes, et ce sera l'expérience seule qui permettra de la déterminer d'une manière certaine.

Nous venons d'analyser, aussi brièvement que possible, les effets produits sur le câble par le mouvement des voitures remorquées, ainsi que les conditions auxquelles l'ensemble doit satisfaire, pour obtenir cette remorque. Comme on le voit, le problème est très complexe et il serait bien difficile d'établir sûrement des formules tenant compte, bien complètement, de toutes les conditions rencontrées dans la pratique. Aussi est-ce à l'expérience qu'on a recours, et sur cette question on a recueilli un grand nombre de renseignements, surtout aux États-Unis, où la traction par câble a reçu un grand développement.

Ce qu'il y a de plus important à connaître dans un système de traction par câble, c'est la part proportionnelle revenant, dans la force totale produite par les machines motrices :

1° Aux poulies motrices avec leurs transmissions;

2° Au câble avec ses supports de roulement ;

3° Enfin aux voitures, en tenant compte des efforts supplémentaires.

Ce rapport est évidemment très variable et dépend beaucoup du trafic de la ligne ; mais en prenant les lignes à trafic intense et à rampes et courbes moyennes, ce qui est du reste le cas le plus général, on peut obtenir des résultats assez concordants.

Nous trouvons dans le mémoire de M. R. Gilhem, présenté au

Congrès des Ingénieurs à l'Exposition de Chicago, de nombreux renseignements à ce sujet. Nous ne pouvons les consigner tous, mais nous donnons le tableau suivant qui semble les résumer assez complètement.

Répartition en centièmes des différents efforts.

Machines et organes de transmission	17,10 p. 100
Câble et accessoires du câble.	38,50 —
Voitures en charge	44,40 —
Total	100,00 p. 100

D'après le même auteur, un câble à vide exige une force de traction de 1 chev. par 100 mètres. D'un autre côté, M. Tavernier, dans l'ouvrage très intéressant qu'il a publié, *les Tramways aux États-Unis*, résume dans le tableau suivant les éléments qui résultent de son enquête aux États-Unis et qui peuvent servir de base au calcul de la force motrice d'un tramway à câble.

Pour chaque courbe de 90° pour une double voie.	10 chev.
— — 45° — —	5 —
Pour 1 kilomètre d'alignement droit de câble . .	5 —
Par kilomètre de câble pour toute voie	10 —
Par voiture	1 à 2,5 chev.
Un chariot tendeur	1/2 —
Deux poulies motrices.	5 —
Machines motrices et appareils de transmission de la force totale	15 à 25 p. 100

En résumé, il résulte de toutes ces expériences qu'on peut généralement admettre que le travail recueilli par les voitures est les 50 p. 100 du travail effectif total produit par les machines motrices, en admettant, bien entendu, qu'il s'agisse d'une ligne à trafic intense et à tracé moyen.

Nous venons d'indiquer dans ce qui précède les principes qui peuvent servir de base à l'établissement des tramways à câble ; beaucoup d'autres développements seraient certainement intéressants à donner, mais ils sortiraient du cadre que nous nous sommes tracé. Nous allons maintenant, dans ce qui va suivre, examiner les différents éléments qui constituent ce système de traction, en prenant nos exemples parmi les réseaux de tramways le plus nouvellement établis.

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS CONSTITUANT LES TRAMWAYS A CABLE

Caniveaux. — Les caniveaux, noyés dans la chaussée et placés dans l'axe de la voie, sont destinés à recevoir les câbles de traction avec leurs poulies de roulement, soit d'alignement droit, soit de courbe. Ils portent à la partie supérieure une rainure permettant le passage du grip qui relie la voiture avec le câble et donne le mouvement à celle-ci ; cette ouverture a une largeur variant de 26 à 32 mm. ; au funiculaire de Belleville, elle est de 29 mm.

Deux fers, soit en forme d' コ, soit en forme de Z, constituent les parois latérales de cette fente. Ces fers sont supportés en général, tous les mètres, par des fermes transversales occupant toute la largeur de la voie et supportant à leur extrémité les rails de celle-ci ; elles sont en fer ou en fonte.

Ces fermes doivent offrir une grande résistance ; elles doivent d'abord être assez solides pour résister aux charges qui circulent sur la chaussée et traversent les voies du tramway ; mais surtout elles doivent être indéformables, c'est-à-dire qu'elles doivent s'opposer aux poussées horizontales qui tendent à faire varier l'ouverture de la rainure et empêcheraient le passage du grip.

Cette condition est d'une grande importance dans les pays à climat froid, où, pendant les gelées, les terres qui entourent le caniveau et les pavages tendent à pousser latéralement les rails de la voie en rétrécissant la rainure.

Cet effet a été très sensible au tramway de Belleville. Ce n'est que par un fort contreventement des fermes qu'on peut obtenir un bon résultat; c'est pour cela que les ingénieurs américains préconisent les fermes en fonte qui sont plus lourdes et résistent mieux aux efforts de compression.

Il est utile toutefois de réunir les fers de la rainure avec les rails extérieurs au moyen d'une tige filetée qui permettra le réglage de la fente, en cas de nécessité.

Ces fermes transversales sont noyées dans la maçonnerie for-

mant les parois latérales du caniveau ; des niches avec regards sont ménagées de place en place pour la visite du câble et des poulies de roulement, et toutes les précautions doivent être prises pour faciliter l'évacuation des eaux et des boues qui peuvent s'introduire dans le caniveau.

Les types de fermes ainsi que les dispositions des caniveaux sont très nombreux. Nous en choisirons deux comme exemples ;

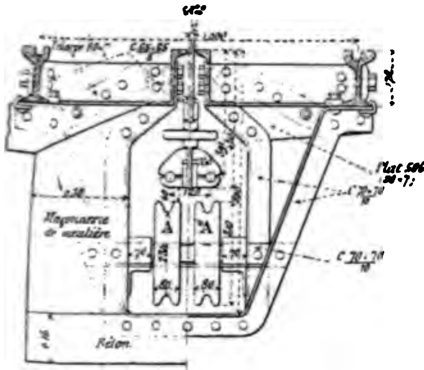


Fig. 73.
Caniveau de Belleville.

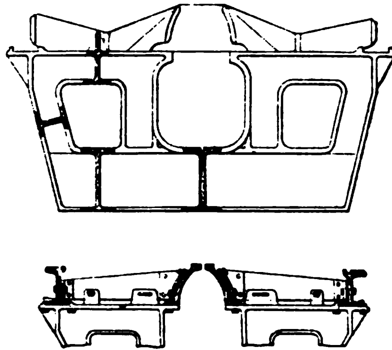


Fig. 74.
Caniveau de la 3e Avenue de New-York.

celui employé pour le funiculaire de Belleville à Paris (fig. 73), et celui du tramway de la 3e Avenue à New-York (fig. 74), qui vient d'être tout récemment mis en service.

Poulies de roulement. — Il y a deux sortes de poulies de roulement : celles employées pour supporter le câble dans les alignements droits, et celles qui doivent le diriger dans les courbes.

Les poulies de roulement en alignement droit sont à axe horizontal, reposant dans des coussinets fixés sur les fermes transversales ; des godets graisseurs sont disposés pour entretenir une lubrification parfaite des axes, chose très importante pour diminuer l'effort de traction du câble.

L'espacement de ces poulies varie entre 9 et 12 m., et, comme nous l'avons dit, des niches sont ménagées latéralement pour en permettre le nettoyage. Le diamètre des poulies varie entre 0,20 m. et 0,50 m. ; au tramway de Belleville il est de

0,234 m. au fond de la gorge (fig. 73) ; au tramway funiculaire de la 3ᵉ Avenue de New-York, il est beaucoup plus grand, et la figure 75 donne le dispositif adopté pour le support de ces poulies.

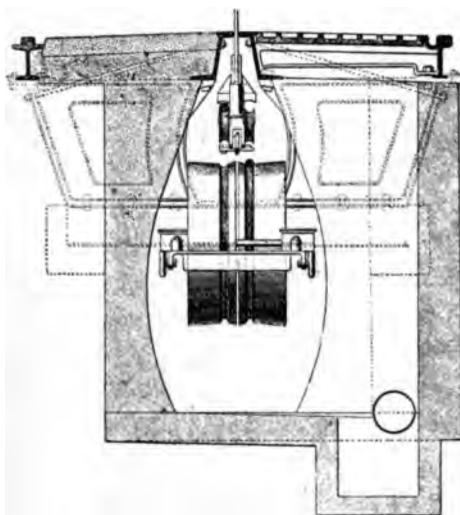


Fig. 75. — Poulies de roulement du funiculaire de la 3ᵉ Avenue.

Une chose importante, et à laquelle les Américains apportent la plus grande attention, c'est de rendre le rapport entre le diamètre de la poulie et celui de l'axe de rotation, le plus grand possible, afin de diminuer les résistances.

Les poulies sont en fonte en un ou plusieurs morceaux, suivant le diamètre ; le bandage est en fonte dure et les résultats obtenus avec ces bandages paraissent meilleurs que ceux obtenus avec des bandages en fonte douce.

Les poulies de courbe sont à axe vertical ou incliné et aussi rapprochées que possible, afin de diminuer la résistance due à la raideur du câble. Leur diamètre varie entre 0,40 m. et 1,20 m. ; les ingénieurs américains préfèrent les grands diamètres qui diminuent les résistances.

Quant à la forme de la gorge, c'est une question d'espèce ; elle dépend de la position occupée et de la tension du câble, qui elle-même varie à chaque instant ; l'expérience seule permet d'en déterminer la forme. Au tramway de Belleville, où les courbes sont très nombreuses et d'un très petit rayon, il a fallu adopter des types très divers, dont la figure 76 indique la disposition.

La figure 77 représente une disposition fréquemment employée en Amérique.

En outre de ces poulies d'alignements et de courbes, il est souvent nécessaire d'établir, aux points bas de rencontre des pentes, des

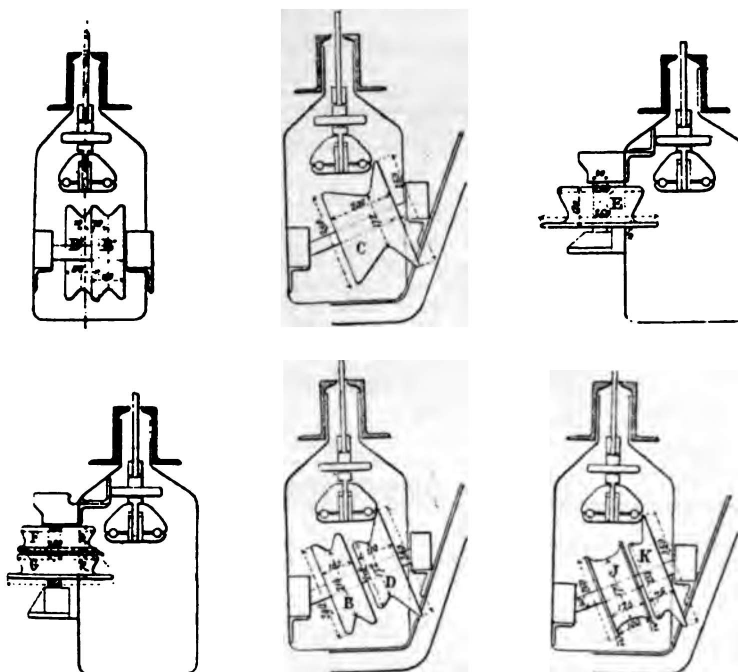


Fig. 76. — Poulies de courbes du funiculaire de Belleville.

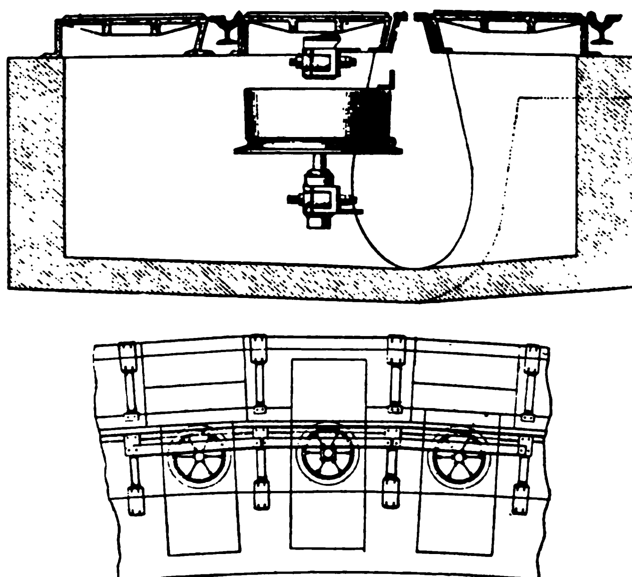


Fig. 77. — Poulies de courbes.

galets de roulement horizontaux, fixés à la partie supérieure du caniveau, sur lesquels viennent s'appuyer les câbles.

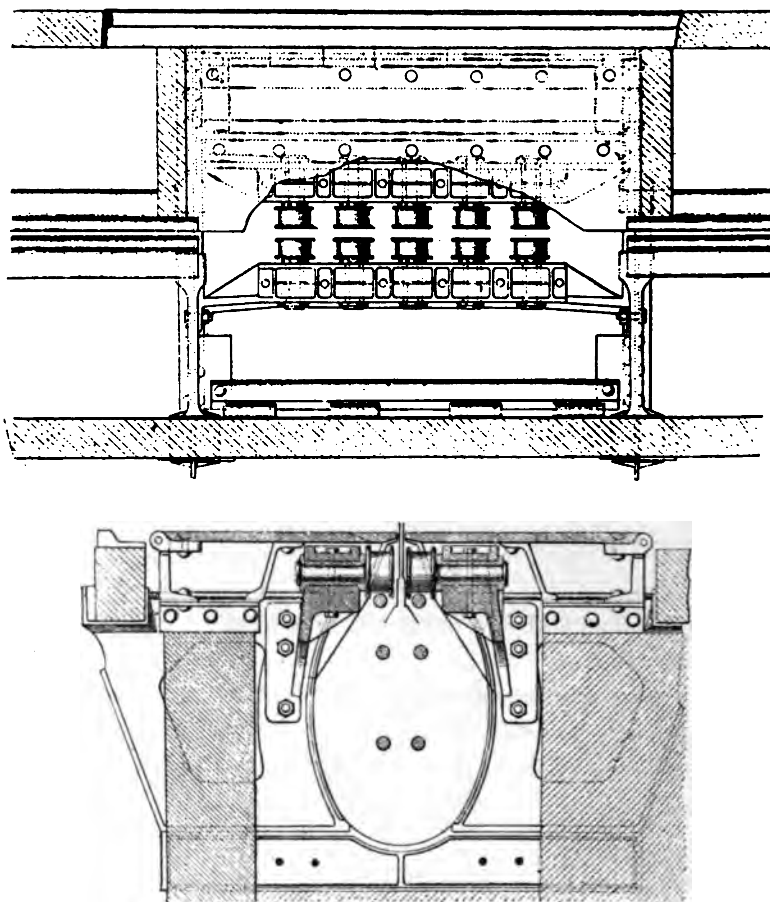


Fig. 78. — Galets de roulement pour changements de pentes.

La figure 78 donne une disposition adoptée dans ce but par les ingénieurs américains.

Système de changement de voie aux points terminus. — Aux points terminus les voitures doivent quitter un câble pour reprendre l'autre et revenir à leur point de départ.

Divers moyens sont employés dans ce but :

L'aiguille de croisement, où les voitures passent d'une voie sur

l'autre par la vitesse acquise et se trouvent disposées par ce passage pour reprendre le câble de retour ; c'est le système en usage sur le tramway de Belleville.

La plaque tournante, placée à l'extrémité du câble près de la poulie de retour, et où la manœuvre de la voiture se fait à la main, comme dans les cas ordinaires.

Enfin la boucle, qui est certainement le dispositif le plus simple, mais qui nécessite un espace suffisant ou des dispositions locales permettant le développement de la courbe formant boucle, soit sur une place libre, soit autour d'un îlot de maisons. C'est la disposition la plus employée en Amérique.

Le mouvement de la voiture sur la boucle est obtenu par un câble auxiliaire à vitesse lente, mis en mouvement, au moyen d'engrenages, par le câble principal.

Câble de traction. — Le câble de traction est une des parties les plus importantes du système funiculaire. Ce câble doit satisfaire à deux conditions : il doit être résistant, pour pouvoir supporter les différents efforts variables de traction qui s'exercent sur lui : il doit être élastique, pour pouvoir supporter facilement les différents efforts supplémentaires auxquels il est soumis et pour pouvoir s'infléchir, sans difficulté, sur les différentes poulies dans les courbes.

Dans ce but, le câble de traction est formé d'une âme en chanvre ou en aloès donnant l'élasticité, autour de laquelle s'enroulent six torons en fils d'acier. Ces torons sont eux-mêmes formés d'une âme en fils d'acier entourée d'une couche de fils, également en acier, d'un plus gros diamètre.

Comment doivent être enroulés ces torons autour de l'âme en chanvre ? Dans les premiers câbles, lorsque les fils des torons étaient enroulés à droite, ces torons étaient enroulés sur l'âme, à gauche, de manière à redresser les fils des torons et à les mettre dans la direction du câble ; on espérait ainsi obtenir une plus grande résistance.

La pratique n'a pas répondu à cette attente, car les câbles ainsi constitués s'usaient très vite, et des ruptures de fils se produisaient fréquemment.

On a alors eu recours à l'enroulement inverse, où les torons sont entourés autour de l'âme dans le même sens que l'enroulement des fils autour des torons. On obtient ainsi le câble représenté par la figure 79. Ce type, qui porte le nom de *Lang rope*,

(A l'état neuf.)



(Après usure.)



Fig. 79. — Câble de traction (*Lang rope*).

est celui exclusivement employé aujourd'hui pour les tramways à câble. Depuis qu'il est employé au funiculaire de Belleville, il a donné de très bons résultats. Il ne s'use plus, comme dans le cas précédent, par rupture de fils, mais par diminution de section de ces fils. Le danger résultant du déroulement, par suite de rupture des fils, est donc diminué et la durée en est prolongée.

Une condition essentielle, pour obtenir un bon câble, c'est d'avoir un acier très homogène.

Les fils qui servent à sa fabrication ont une résistance qui varie de 120 à 150 kg. par millimètre carré, avec 1 p. 100 d'allongement; on met à l'intérieur les fils les plus résistants.

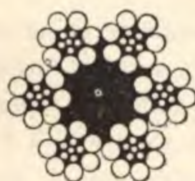


Fig. 80.
Câble de Belleville.

Le diamètre des câbles varie entre 29 et 38 mm.; au funiculaire de Belleville, il est de 29 mm. avec un poids de 3 kg. par mètre courant; la figure 80 représente sa coupe. Il est formé, comme on le voit, de six torons composés de deux couches de fils, la couche intérieure comprenant 5 fils de 1,5 mm. de diamètre et la couche extérieure de 7 fils de 3 mm.; la section totale des fils est de 354,2 mm².

Divers autres systèmes de câbles ont été proposés, notamment l

câble dit « Excelsior », où l'âme est formée de couches concentriques de fils d'acier recouvertes d'une couche ou deux de fils en forme I qui s'emboîtent l'un dans l'autre et les empêchent, en cas de rupture, de sortir du câble (fig. 81).



Fig. 81. — Câble *Excelsior*.

La surface est parfaitement lisse, et l'usure due au frottement devrait se faire, semble-t-il, régulièrement. Malheureusement l'épissure de ces câbles est très difficile et ne peut s'obtenir que par soudure électrique. C'est ce qui a fait qu'ils n'ont pas reçu d'application aux tramways.

La durée des câbles dépend naturellement de la résistance de l'acier et du trafic ; on peut toutefois admettre qu'elle est en moyenne de six à huit mois. Pour diminuer l'oxydation du câble, et par suite son usure, et pour diminuer aussi le frottement sur les différentes poulies, on a soin de l'enduire d'une couche protectrice. Bien des compositions ont été proposées pour cet enduit, et presque toutes sont à base de goudron. Voici la composition employée à Belleville, après de nombreux essais : goudron de Norvège 200 kg., huile végétale 100 kg., suif 20 kg., le tout bouilli ensemble. On enduit le câble avec cette composition, une fois par jour, en la faisant couler sur le câble sortant au moyen d'un petit réservoir placé près des poulies motrices.

L'allongement total permanent qui se produit peu de temps après la mise en service du câble varie suivant le trafic et les différents efforts qu'il a à supporter ; il est de 0,6 à 1 p. 100 de la longueur totale.

Les épissures, c'est-à-dire la jonction des deux bouts du câble, au moment de la pose, ou les jonctions à faire entre deux bouts, par suite de réparations, sont une opération très délicate, qui demande l'emploi d'ouvriers habiles et expérimentés.

Après l'épissure, le câble doit avoir une surface parfaitement

cylindrique et exactement de même diamètre que celle du câble, sans quoi des frottements anormaux se produiraient en cet endroit, des fils se casseraient et, au bout de très peu de temps, le câble serait hors de service.

Nous n'indiquerons pas la manière dont se fait l'épissure; on la trouvera décrite, très en détail, dans le mémoire de M. Widmer, sur le funiculaire de Belleville [1].

Poulies motrices et commande de la machine à vapeur. — Le câble rentrant peut s'enrouler sur les poulies motrices de deux manières différentes; soit en forme de 8, soit en brins parallèles



Fig. 82.

(fig. 82). La première disposition augmente l'angle d'enroulement du câble autour de la poulie, et par conséquent la résistance au glissement, mais, d'un autre côté, elle augmente la déformation, et par suite la raideur du câble entre en jeu.

C'est le système à brins parallèles qui est le plus employé par les ingénieurs américains et qui semble donner les résultats les plus avantageux. Au tramway de Belleville, cependant, l'enroulement en 8 a été adopté.

La tension du câble rentrant est maximum à l'entrée de la première poulie motrice; elle va en diminuant progressivement jusqu'à la dernière poulie où commence le câble sortant. Ces variations d'effort font que la première poulie s'use davantage et plus vite que les autres, et qu'au bout d'un certain temps de service le câble de traction est obligé de glisser sur cette première poulie et sur les suivantes. Il en résulte des à-coup sur la machine motrice, nuisibles à sa bonne marche.

Pour obvier à cet inconvénient, on peut employer deux moyens: soit faire varier le diamètre des poulies motrices d'une manière décroissante depuis le brin rentrant jusqu'au brin sortant, soit

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, numéro de mars 1893.

employer des poulies motrices du type Walker (fig. 83), où le bandage qui reçoit le câble peut glisser à l'intérieur de la jante disposée à cet effet. Ce type de roues motrices, très employé, donne de bons résultats.

Les roues motrices sont généralement en fonte et d'un seul morceau ; pour égaliser les diamètres, par suite d'usure, il faut souvent mettre ces roues sur le tour, et par suite enlever la roue entière; pour éviter cet inconvénient, on emploie quelquefois aux États-Unis des poulies où les gorges sont formées de tronçons extérieurs fixés sur la roue au moyen de boulons (fig. 84), et qui sont facilement remplaçables.

Le diamètre des roues motrices varie entre 2,50 m. et 3,60 m. ; une règle assez généralement suivie aux États-Unis est de faire ce diamètre égal à cent fois celui du câble de traction.

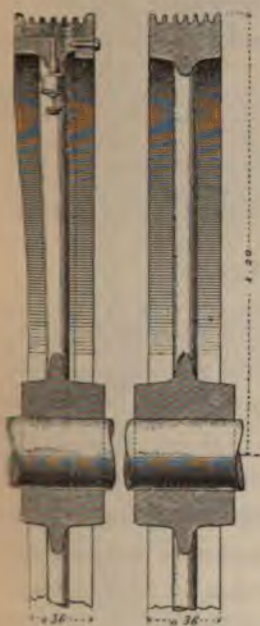


Fig. 83. — Poulie Walker.



Fig. 84. — Poulies avec gorges rapportées.

Pour obtenir un bon fonctionnement du câble et des machines motrices, il est de toute importance qu'il n'y ait aucun glissement de celui-ci sur les poulies motrices; on cherche donc à augmenter le coefficient de frottement entre le câble et le métal qui forme le fond de la gorge de la poulie. Dans ce but, on place au fond de cette gorge des cales, soit en bois, soit en cuir, sur lesquelles le câble vient s'appuyer, le coefficient de frottement du fer sur le bois ou le cuir étant plus grand que celui du fer sur la fonte.

Il résulte de ces observations que le câble lui-même ne doit pas

être trop lubrifié, sans quoi il glisserait sur les poulies motrices; aussi ne lui donne-t-on, comme nous l'avons indiqué, qu'une seule lubrification par jour, suffisante pour diminuer les frottements sur les poulies.

Les poulies motrices sont commandées par la machine à vapeur de deux manières différentes :

1° La machine à vapeur commande une seule poulie motrice, la seconde étant entraînée par l'enroulement du câble sur la première (fig. 85);

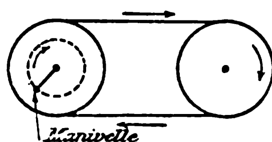


Fig. 85.

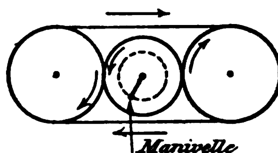


Fig. 86.

2° La machine à vapeur commande au moyen d'un engrenage les deux poulies motrices (fig. 86), ou bien les deux poulies motrices sont commandées directement, comme à Glasgow.

Dans ce dernier cas, la puissance de traction est supérieure d'environ 15 p. 100 à celle obtenue dans le premier cas. C'est cette disposition qui est le plus généralement adoptée aujourd'hui.

Les machines à vapeur qui commandent les poulies motrices et, par conséquent, mettent le câble en mouvement doivent satisfaire à différentes conditions très importantes.

Elles doivent avoir une marche aussi régulière que possible, et par suite être munies de régulateurs très sensibles et agissant rapidement, et en même temps de volants lourds et bien équilibrés. Ces machines doivent avoir une puissance largement suffisante pour faire face à toutes les variations possibles des efforts de traction ; elles doivent être, ainsi que les chaudières, largement calculées. La régularité de la marche en dépend, et par contre-coup la consommation de combustible.

Différentes dispositions ont été étudiées pour la commande des poulies motrices par les machines à vapeur. Toutefois ces dispositions peuvent se réduire à deux :

1° Dans la première, la machine à vapeur actionne directement un arbre placé entre les poulies, arbre qui commande

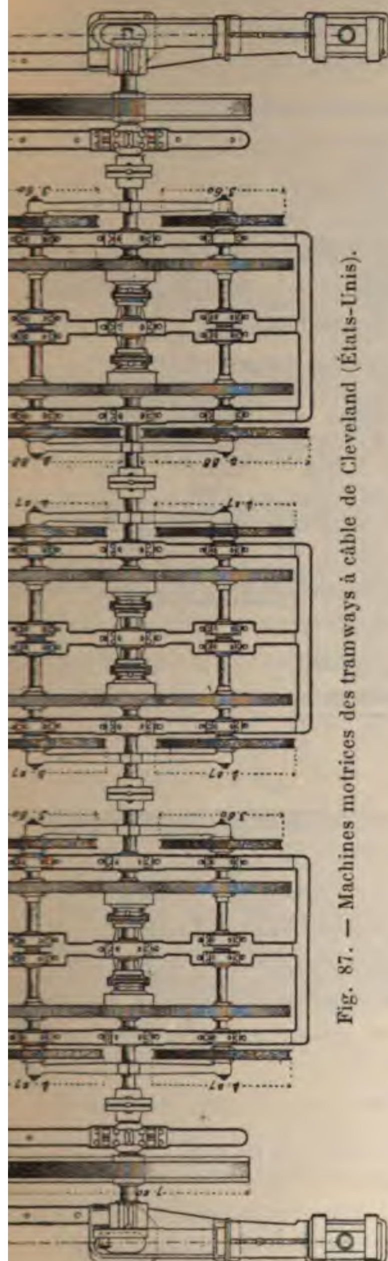


Fig. 87. — Machines motrices des tramways à câble de Cleveland (États-Unis).

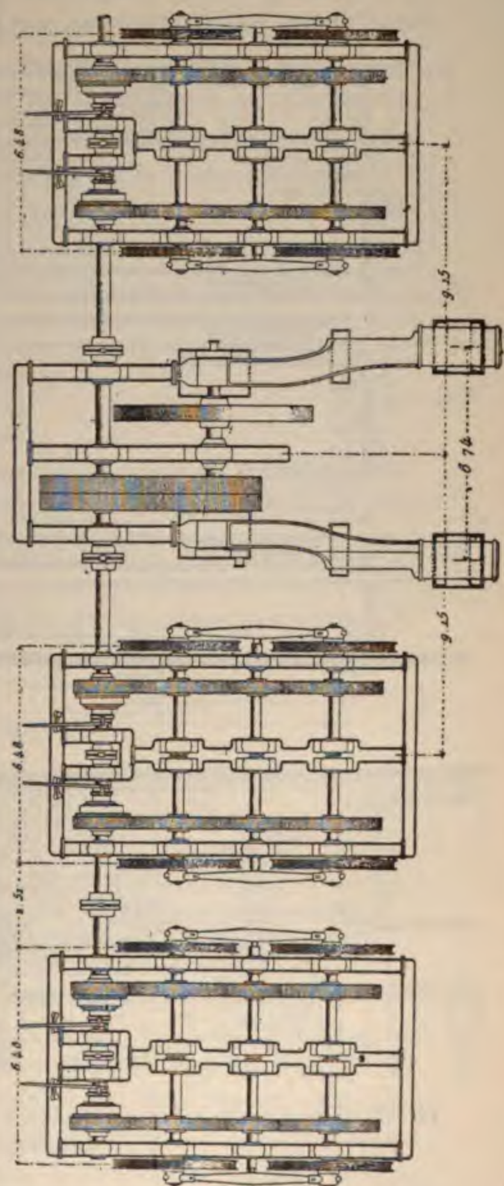


Fig. 88. — Machines motrices des tramways à câble de Denver (États-Unis).

par engrenages les poulies motrices. La figure 87 montre la disposition adoptée aux tramways de Cleveland (États-Unis) ; ou bien elle actionne, soit directement, soit par engrenages, un arbre exté-

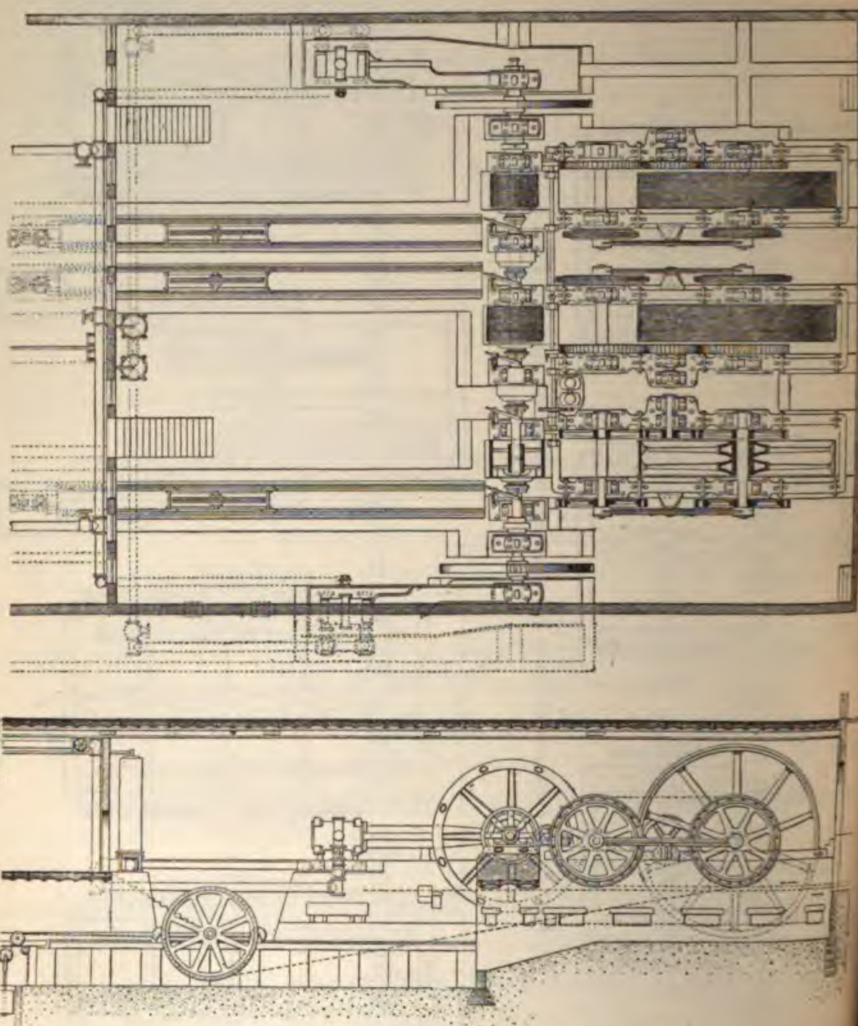


Fig. 89. — Machines motrices des tramways à câble de la 10e Avenue à New-York (*Usine Bayard*).

rieur aux poulies motrices, arbre qui commande à son tour, également par engrenages, ces poulies. La figure 88 montre la disposition des tramways de Denver (États-Unis).

2° Dans la seconde, qui tend à se répandre pour les grandes installations à très fort trafic, la machine à vapeur actionne, soit directement, soit par courroie, ou plutôt par corde, un arbre intermédiaire qui à son tour commande, soit par courroie, soit par corde, une poulie actionnant par engrenages ou directement les poulies motrices. Cette disposition donne un mouvement plus doux et moins bruyant. La figure 89 est le dispositif employé à l'usine Bayard de la 10e Avenue à New-York.

Les dispositions que nous venons d'indiquer s'appliquent au cas où les deux poulies motrices sont actionnées par la machine à vapeur ; c'est le cas le plus général. Le cas d'une seule poulie est exceptionnel ; on le trouve cependant au funiculaire de Belleville à Paris.

Tendeur. — Le tendeur, comme nous l'avons dit précédemment, a pour mission de maintenir sur le brin sortant du câble une tension suffisante pour empêcher le glissement de celui-ci sur les poulies, et, en même temps, de compenser les allongements, soit permanents, soit temporaires, qui se produisent dans le câble.

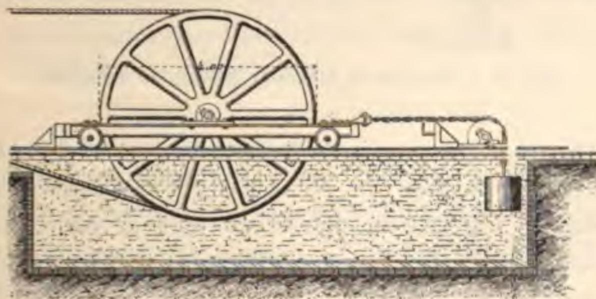


Fig. 90. — Tendeur.

Le tendeur (fig. 90) se compose d'une grande roue à gorge sur laquelle vient passer le câble sortant. Cette roue repose, au moyen de coussinets, sur un châssis en fer s'appuyant sur quatre roues ou galets, se déplaçant sur deux rails. A l'arrière du châssis est fixée une chaîne supportant à son extrémité, par l'intermédiaire d'une poulie, un poids qui sera réglé suivant la tension à équilibrer et qui dépendra du nombre de voitures en service et d'autres circonstances

accessoires dont nous avons parlé plus haut. Cette disposition rend mobile le chariot du tendeur sur les rails et lui permet de compenser les allongements du câble de traction.

La longueur de voie sur laquelle circule le chariot doit être assez grande pour tenir compte de l'allongement total du câble, qui, au début, peut atteindre jusqu'à 1 p. 100 de sa longueur.

D'autres dispositions de tendeur ont été étudiées ; on a cherché, dans quelques-unes, à diminuer la longueur de la course en faisant reposer le tendeur sur un double chariot ; dans d'autres, on a voulu faire varier l'action des contrepoids d'équilibre à l'aide de chariots se mouvant sur des plans inclinés, ou par des ressorts ; mais le système que nous venons de décrire est le plus simple et donne de bons résultats.

Nous devons toutefois dire quelques mots d'un tendeur qui devient d'un usage assez fréquent aux États-Unis et qui vient d'être adopté au subway de Glasgow (fig. 91).

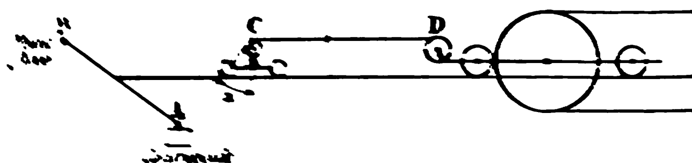


Fig. [illegible] — Tendeur du tramway à câble de Glasgow.

[illegible] à deux barres de fer AB et AC, [illegible] au point fixe B et l'autre à un câble [illegible] du chariot du tendeur [illegible] est enroulé [illegible] est supporté par un [illegible] rails. En enroulant le câble CD sur le [illegible] CD, et par [illegible] de la barre AC. L'effort [illegible] du tendeur [illegible] suivant [illegible] du câble [illegible] modifiée suivant les [illegible]

TRAVAIL MOYEN ET DÉPENSE DE CHARBON PAR KILOMÈTRE-TRAIN

Cherchons cette dépense de charbon pour le funiculaire de Belleville, qui se trouve dans des conditions toutes spéciales, en joignant à un service intense des rampes très fortes et des courbes de très petit rayon.

La distance comprise entre la place de la République et la place de l'Église à Belleville est de 2044 m.; sur cette longueur il y a environ 600 m. en courbes de faible rayon et pour lesquelles on peut admettre un coefficient moyen de 10 kg. par tonne. En admettant un coefficient de 15 kg. par tonne comme résistance en ligne droite et en palier, ce qui n'est pas exagéré pour cette ligne, nous avons cherché, par la méthode indiquée au début de cette étude, la résistance moyenne à appliquer pour la distance entière (aller et retour). Le nombre d'arrêts réglementaires est de six en montant et de six en descendant, et la vitesse du câble est de 3 m. par seconde.

Le chiffre que nous avons obtenu est de 28,31 kg., soit une résistance supplémentaire de 28,31 — 15,00 = 13,31 kg. Les deux voitures remorquées pesant en charge 10 t., nous avons un travail par kilomètre-train de :

$$28{,}31 \times 10 \times 1\,000 = 283\,100 \text{ kg.}$$

D'après les nombreux essais qui ont été faits, on peut admettre un coefficient de rendement de 0,50 entre les voitures et l'arbre moteur de la machine à vapeur. Celle-ci devra donc produire par kilomètre-train :

$$\frac{283\,100}{0{,}50 \times 270\,000} = 2{,}09 \text{ chev.-h.}$$

D'après les essais faits sur la consommation de charbon des machines, cette consommation correspond à 1,15 kg. par cheval effectif. La consommation de charbon par kilomètre-train sera donc de :

$$2{,}09 \times 1{,}15 = 2{,}40 \text{ kg.}$$

DÉPENSE DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

La dépense de traction en 1895 a été, par kilomètre-voitu (voiture de 24 places), de 0,27 fr.[1].

Par *kilomètre-train* (le train se compose de 2 voitures con nant 50 voyageurs environ), cette dépense a été de 0,54 fr.[1].

Le coefficient d'exploitation en 1896 a été de 61 p. 100.

[1] Dans cette dépense, l'amortissement du capital de premier établissement n' pas compris.

TRACTION ÉLECTRIQUE

PAR FILS AÉRIENS ET TROLLEYS

Dans le système de traction électrique par fils aériens, l'énergie électrique est produite dans une usine centrale au moyen de dynamos. Le courant produit est envoyé dans un fil conducteur aérien, suspendu au-dessus des voies, sur toute leur longueur, suivant des dispositifs variables.

Une poulie à gorge, qui porte le nom de *trolley*, est emmanchée à l'extrémité d'une tige fixée sur la toiture de la voiture. La poulie est constamment maintenue en contact avec le fil aérien, à l'aide de ressorts, et sert de prise au courant qui est amené dans la voiture par la tige du trolley. Ce courant, après avoir traversé un appareil de réglage appelé coupleur [1] mis à la disposition du wattman, se rend aux dynamos réceptrices de la voiture, et imprime le mouvement de rotation aux essieux.

Le courant revient ensuite à la dynamo génératrice de l'usine centrale, soit par un second fil aérien parallèle au premier, comme on le faisait au début de la traction électrique, soit par les rails de la voie, comme on le fait aujourd'hui plus généralement.

Nous aurons donc à examiner successivement les différentes parties qui constituent l'ensemble de ce système de traction :

1° L'usine centrale où sont installées les dynamos génératrices de l'énergie électrique ;

[1] Contrôleur, commutateur, régulateur.

2° [illegible] destinés à amener cette énergie électrique [illegible] ;

[illegible] de prise de courant reliant les fils aériens aux [illegible] ;

[illegible] des voitures, qui donnent le mouvement [illegible] ;

[illegible] qui servent de conduite de retour au [illegible] avoir du tour à l'heure, sont généralement [illegible].

[illegible] NÉCESSAIRE À L'USINE CENTRALE [illegible] D'UNE LIGNE DONNÉE [illegible] DÉTERMINÉ

[illegible] question à examiner lorsqu'il s'agit de l'installation d'une [illegible] est la détermination aussi exacte que possible de la puissance des machines qui doivent produire l'énergie [illegible] nécessaire pour alimenter, sur un tracé et un profil donnés, un trafic déterminé.

[illegible] puissance des machines dépend des trois conditions principales [illegible] :

1° [illegible] à produire à la jante des roues des véhicules pour [illegible] sur un profil donné, le nombre [illegible] ;

2° D[illegible] ;

3° D[illegible] résultant du plus ou moins grand nombre de voitures qui démarrent au même moment sur la ligne, et qui produisent des variations d'efforts considérables, comme nous l'indiquerons plus loin.

Nous allons examiner ces trois conditions.

1° *Effort à produire à la jante des roues des véhicules.* — Il serait très difficile d'établir une formule générale permettant de résoudre ce problème dans tous les cas possibles ; il doit être examiné pour chaque cas particulier, et l'exemple que nous allons donner montrera la marche à suivre dans les différents cas qui pourront se présenter en pratique.

Nous rappellerons d'abord la formule que nous avons donnée au début, formule qui permet de déterminer en chevaux le travail nécessaire pour remorquer un poids P, avec une vitesse V, sur une rampe p, la résistance par tonne en palier étant r.

$$\mathcal{T} = \frac{P(p + r)V}{75}.$$

C'est cette formule qui servira de base au calcul suivant :

Soit le profil ci-dessous (fig. 92), d'une longueur de 12 km.,

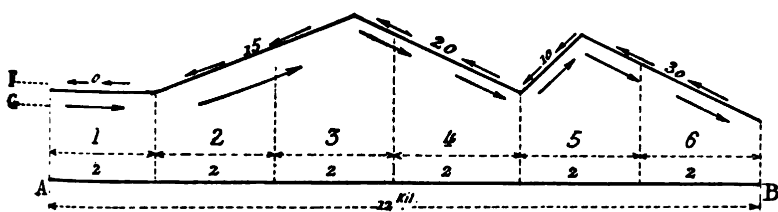


Fig. 92.

divisé d'une manière fictive en 6 sections (on pourrait en prendre davantage ou moins) d'une longueur de 2 km. chacune.

La vitesse est supposée constante et de 12 km. à l'heure, de sorte que le parcours entier se fera en une heure. Les voitures doivent partir à 5 minutes d'intervalle ; le nombre des voitures en circulation dans chaque sens sera donc de 12, soit 24 en tout.

Il y en aura par suite deux, dans chaque sens, pour chacune des subdivisions indiquées sur le profil.

Les pentes et rampes sont indiquées sur la figure en millimètres.

Les voitures se dirigeant de A vers B seront représentées par G, et celles se dirigeant de B vers A par F.

Il ne faut pas oublier que sur les pentes supérieures à 13,5 mm., correspondant au coefficient de résistance en palier que nous avons admis, il n'y aura aucun effort à produire et que, par suite, aucun effort ne sera demandé à l'usine centrale.

Le tableau suivant donne le travail total à produire aux jantes des véhicules.

Le poids de la voiture est de 10 t.

Sens G		Chevaux	Sens F	Chevaux
Section 1. —	$\frac{10 \times 3,33}{[illegible]} \times 2 \times 13,5 =$	12,04	$2 \times 0,444 \times 13,5 =$	12,01
Section 2. —	$2 \times 0,444 (15 + 13,5) =$	25,37	—	
Section 3. —	$0,444 (15 + 13,5) =$	12,65	$0,444 (20 + 13,5) =$	14,87
Section 4. —	—		$2 \times 0,444 (20 + 13,5) =$	29,75
Section 5. —	$0,444 (10 + 13,5) =$	10,43	$0,444 (13,5 - 10) =$	1,55
			$0,444 (30 + 13,5) =$	19,31
Section 6. —	—		$2 \times 0,444 (30 + 13,5) =$	38,63
	Total.	60,49	Total.	116,12

Le travail total à produire à la jante sera donc :

$$60,49 + 116,12 = 176,61 \text{ chev.};$$

soit par voiture :

$$\frac{176,61}{24} = 7,37 \text{ chev.}$$

Tel est le travail en chevaux à produire à la jante des roues des véhicules ; mais le travail à produire par les machines à vapeur de l'usine centrale sera ce travail divisé par le rendement total du système ; quel est ce rendement ?

2° *Rendement total.* — Le rendement total dépend de trois choses :

1° Du rendement des moteurs des voitures. Ce rendement, pour les moteurs à simple réduction, peut atteindre 75 p. 100 à pleine charge ; mais à faible charge, il peut descendre à 65 p. 100 ; admettons une moyenne de 70 p. 100 ;

2° Des pertes de charge dans la ligne et dans les feeders ; on s'arrange généralement pour que cette perte ne dépasse pas 10 p. 100 ; le rendement est donc de 90 p. 100 ;

3° Du rendement des moteurs de l'usine, se composant des dynamos, des transmissions et des machines à vapeur. Ce rendement est très variable, par suite des grandes variations d'efforts qui se produisent en marche et que nous expliquerons tout à l'heure. Il peut varier de 60 à 70 p. 100 et ce dernier chiffre est un maximum ; admettons-le cependant.

Le rendement total sera donc : $0,70 \times 0,90 \times 0,70 = 0,44$.

Ce rendement ne sera pas toujours atteint, surtout pour les lignes à faible trafic ; il y a des exemples où le rendement total ne dépasse pas 30 p. 100.

En admettant le chiffre de 44 p. 100, la force en chevaux à produire à l'usine sera donc de :

$$\frac{176,61}{0,44} = 401,40 \text{ chev.};$$

soit par voiture :

$$\frac{401,40}{24} = 16,7 \text{ chev.}$$

4° Nous avons enfin à tenir compte des *efforts variables et supplémentaires dus aux démarrages des voitures.* Ces efforts supplémentaires sont, dans certains cas, très importants, et nous allons essayer d'en tenir compte, en cherchant également les causes principales qui influent sur eux.

Soit une ligne d'une certaine longueur, sur laquelle circulent en même temps N voitures.

Soit :

P : le poids de chaque voiture;

r : la résistance moyenne par tonne;

V : la vitesse normale de marche, en mètres par seconde;

m : le nombre de voitures démarrant au même moment sur la ligne, ce nombre variant entre 0 et N;

t : le temps en secondes du démarrage.

Le travail en chevaux, à la jante, nécessaire pour la marche des voitures sera :

$$\frac{PrVN}{75}; \tag{1}$$

Le travail maximum, occasionné par le démarrage de m voitures devant atteindre la vitesse V en t secondes, sera :

$$\frac{PV}{gt} \times \frac{V}{75} m = \frac{102 \text{ PV}^2}{75\, t} m.$$

Le travail total à produire à la jante sera donc :

$$\frac{PrVN}{75} + \frac{102 \text{ PV}^2}{75\, t} m = \frac{PV}{75} \left(rN + \frac{102 \text{ V}m}{t} \right). \tag{2}$$

Le rapport entre ce travail total à produire à la jante et celui

nécessaire, lorsqu'il n'y a aucun démarrage de voiture, sera le rapport entre les formules (2) et (1), en posant :

$$C = rN + \frac{102\ Vm}{t}.$$

$$\frac{\frac{PVC}{75}}{\frac{PrVN}{75}} = \frac{75\ PVC}{75\ PrVN} = \frac{C}{rN} = \frac{1}{rN}\left(rN + \frac{102\ Vm}{t}\right)$$

$$= 1 + \frac{102\ Vm}{trN}. \quad (3$$

Cette formule indique l'effort supplémentaire qui doit être produit, par suite des démarrages des voitures, relativement au travail normal des N voitures.

Cet effort supplémentaire croît naturellement avec la vitesse de marche normale et avec le nombre des voitures m qui démarrent au même moment. Il est en raison inverse du nombre des voitures

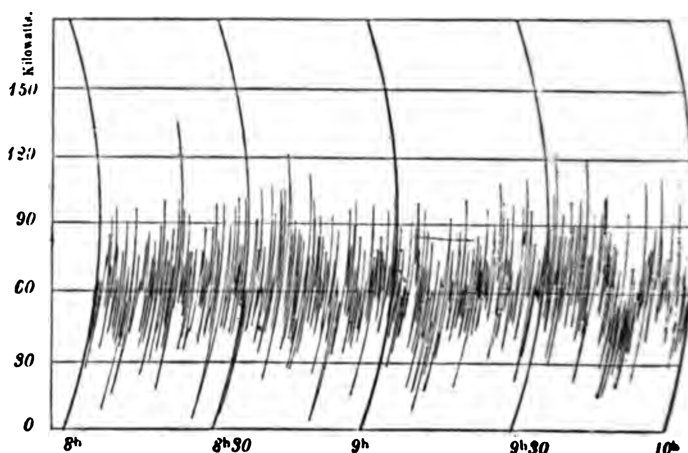


Fig. 93. — Courbe de débit d'une usine alimentant un réseau à faible trafic[1].

en service, ce qui indique que les variations d'effort à l'usine centrale seront d'autant plus grandes que le nombre des voitures en service sera plus petit.

C'est ce que montrent du reste clairement les courbes de débit en ampères, relevées sur les machines alimentant un réseau à faible trafic ou à grand trafic (fig. 93-94).

[1] Cette figure, ainsi que plusieurs autres relatives à la traction électrique, ont été empruntées à l'ouvrage de M. H. Maréchal sur « les Tramways électriques ».

Cet effort supplémentaire est également en raison inverse du temps fixé pour le démarrage, ainsi que de la résistance moyenne à la traction.

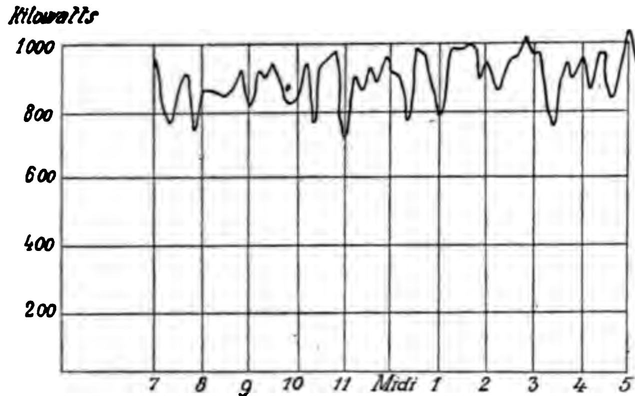


Fig. 94. — Courbe de débit d'une usine alimentant un réseau à trafic intense.

Si, dans l'équation (3), nous prenons les conditions de marche moyenne, soit :

$$V = 4{,}00 \text{ m.}; \qquad r = 13{,}5; \qquad t = 7'';$$

il viendra :

$$1 + \frac{102 \times 4 \times m}{N \times 13{,}5 \times 7} = 4{,}32\,\frac{m}{N} + 1.$$

Si, de plus, nous considérons une ligne à trafic peu intense où le nombre de voitures en circulation est de $10 = N$ et une ligne à trafic très intense où $N = 100$, nous obtiendrons, pour différentes valeurs m du nombre de voitures démarrant au même moment, les rapports suivants dus à ces efforts de démarrage :

$N = 10$; $F = 4{,}32\,\frac{m}{10} + 1$;	$N = 100$; $F = 4{,}32\,\frac{m}{100} + 1$;
$m = 1$; $F = 1{,}43$	$m = 1$; $F = 1{,}043$
$m = 2$; $F = 1{,}86$	$m = 2$; $F = 1{,}084$
$m = 3$; $F = 2{,}29$	$m = 5$; $F = 1{,}220$
$m = 5$; $F = 3{,}16$	$m = 10$; $F = 1{,}430$

Ce tableau montre combien est grande l'influence du nombre des voitures en circulation sur les variations d'effort.

Reprenons le cas spécial que nous avons examiné et la formule (3) avec les valeurs suivantes :

$$V = 3{,}33 \text{ m.}; \quad t = 7''; \quad N = 24;$$

$r = 25{,}50$ kg., qui est la moyenne des résultats obtenus dans le tableau précédent (p. 238).

Nous aurons :

$$R = 1 + \frac{102 \times 3{,}33}{7 \times 24 \times 25{,}5} m = 1 + 0{,}079 \text{ m.}$$

En faisant varier le nombre des voitures qui démarrent au même moment, depuis : $m = 1$ jusqu'à : $m = 5$, qui sera un maximum qu'on peut admettre pratiquement, on obtiendra pour R les valeurs suivantes :

$m = 1$	$R = 1{,}079$;
$m = 2$	$1{,}158$;
$m = 3$	$1{,}237$;
$m = 4$	$1{,}316$;
$m = 5$	$1{,}395$;

Ce sera donc par ce dernier chiffre, 1,40, qu'il faudra multiplier le résultat obtenu précédemment pour avoir le travail total à fournir à l'usine. Nous aurons ainsi : $401{,}40 \times 1{,}40 = 561{,}96$ ch.; soit par voiture : $\frac{561{,}96}{24} = 23{,}41$ ch. à fournir par l'usine centrale.

La méthode que nous venons d'indiquer permet de se rendre compte assez exactement du travail à fournir à l'usine pour un profil et un trafic donnés. Toutefois, sans passer par ces calculs quelquefois longs, et, comme premier aperçu, sauf à le vérifier ensuite, on peut admettre les chiffres suivants que l'expérience semble confirmer :

Nombre de voitures en service.	Puissance par voiture à l'usine.
1 à 5.	35 chev.
5 à 10.	30 —
10 à 15.	25 —
15 à 25.	20 —
25 à 30.	15 —

Ces chiffres s'appliquent à des voitures à 50 places pesant 10 t. environ, marchant à une vitesse moyenne de 14 km. à l'heure.

Nous devons ajouter, qu'en outre de ces variations d'efforts instantanés dus aux démarrages, il y a lieu aussi de tenir compte des augmentations de puissance à produire à certaines heures de la journée, où le trafic est le plus intense et où le nombre des voitures en circulation doit être augmenté.

Cette augmentation est quelquefois importante, surtout dans les villes industrielles, au moment de l'entrée et de la sortie des ouvriers et employés des usines et des ateliers.

Les jours de fête ou de marché, le même fait se reproduit et il y a lieu d'en tenir compte.

Il y a donc toujours intérêt à avoir une réserve raisonnable à l'usine centrale, afin de pouvoir tenir compte de ces variations d'effort qu'on ne peut pas toujours prévoir et qui rendent alors le service impossible, ou au moins très difficile, lorsque les machines ont été calculées pour le strict nécessaire.

Nous aurons maintenant à dire quelques mots des dynamos génératrices et des appareils moteurs, qui sont du reste les mêmes que ceux employés dans les différentes applications industrielles de l'électricité. Aussi ne signalerons-nous que les modifications à y apporter et qui sont spéciales à la traction électrique.

Usine centrale. — L'emplacement de l'usine centrale semble tout indiqué; il paraît en effet tout naturel de la placer au centre du système, lorsque le réseau se compose d'un certain nombre de lignes convergentes réunies par d'autres lignes concentriques; ou au milieu de la ligne, lorsque le réseau se réduit à une ligne unique.

Mais il est une autre considération d'une grande importance et qu'il ne faut pas négliger; c'est la question du transport du charbon et de l'alimentation d'eau pour les chaudières.

Le transport du charbon et les différentes manutentions qui en résultent entrent pour une grande part dans les dépenses de production de vapeur des machines motrices. Si donc les circonstances locales permettaient d'installer l'usine centrale, soit près d'une ligne de chemin de fer, soit près d'un fleuve, d'une rivière navigable ou d'un canal, en facilitant ainsi le déchargement direct du charbon dans l'usine, il y aurait tout avantage à le faire. Il y

aurait lieu toutefois de s'assurer si les dépenses supplémentaires résultant du choix de cet emplacement, telles que feeders d'alimentation du courant d'aller et de retour, plus-value de la valeur des terrains, etc., ne compenseraient pas et n'arriveraient même pas à dépasser les économies dues au transport par voiture.

C'est donc entièrement une question d'espèce qu'il est difficile de généraliser. Il en est de même de la question d'alimentation d'eau, qui aura une importance plus ou moins grande, selon qu'on emploiera des machines à vapeur avec ou sans condensation.

Dynamos génératrices. — Il y a tout intérêt à employer de grandes unités pour la production de la puissance électrique. D'abord les machines de grande puissance sont économiques au point de vue de la main-d'œuvre, et leur surveillance est facile; ensuite leur rendement est très bon.

Aussi emploie-t-on aujourd'hui couramment des unités de 300, 500, 1 000 et même 1 500 kilowatts, lorsqu'il s'agit de grandes installations, contrairement à ce qui se faisait au début de la traction électrique, où on ne dépassait jamais des unités de 200 kilowatts.

Ces grandes unités obligent à abandonner les dynamos bipolaires et à employer les machines multipolaires.

L'établissement des premières devient en effet difficile, lorsqu'il s'agit de grandes puissances; de plus les réactions d'induit et les actions perturbatrices prennent une grande importance dans un champ unique, et il y a tout avantage à les répartir en plusieurs champs magnétiques. De là l'emploi actuel de dynamos à quatre et six pôles et même plus pour les grandes puissances.

Les dynamos multipolaires ont encore le grand avantage de permettre la réduction de la vitesse angulaire, ce qui facilite la commande directe par les machines à vapeur, tout en conservant à celles-ci une vitesse modérée, ce qui est avantageux. A puissance égale, les dynamos multipolaires sont plus légères que les machines bipolaires, mais elles ont, par contre, l'inconvénient d'être plus coûteuses, par suite de leur construction plus compliquée, surtout au point de vue de l'excitation.

Nous devons ajouter qu'il y a toujours intérêt à faire travailler

normalement les dynamos génératrices dans le voisinage de leur maximum de puissance, tout en tenant compte, bien entendu, des variations d'effort dues aux démarrages et dont nous avons parlé ; car, dans ces conditions, ces variations auront peu d'influence sur le rendement des dynamos, les courbes caractéristiques des machines étant alors, pour ainsi dire, horizontales.

On parvient à construire aujourd'hui des dynamos dont le rendement, entre la pleine et la demi-charge, varie de 2 à 3 p. 100, et qui, au dixième de la charge, ont encore un rendement électrique de 85 p. 100.

L'excitation des dynamos génératrices destinées à la traction électrique se fait en *compound*, avec enroulement en série à gros fil et enroulement en dérivation à fil fin ; cet enroulement est calculé de manière à obtenir un voltage constant aux bornes de la dynamo, quelles que soient les variations de charge, la vitesse de la dynamo restant constante ; cette disposition est indispensable, pour tenir compte des variations brusques d'effort qui se produisent au démarrage et qui peuvent arriver à doubler et même à tripler l'effort moyen à produire par les dynamos génératrices, lorsque le nombre des voitures en circulation est peu important. Un rhéostat installé sur le tableau de distribution permet de régler cette excitation.

On applique même souvent l'*hypercompoundage*, dans lequel l'enroulement compound est calculé de manière à avoir un voltage constant, non plus seulement aux bornes de la génératrice, mais bien aux points de prise de courant sur la ligne ; dans ces conditions, le voltage augmente avec la charge.

Lorsque plusieurs dynamos doivent être associées pour produire la force motrice totale, on réunit ces dynamos en parallèle. Cette disposition n'offre aucun inconvénient lorsque les dynamos à excitation compound ont la même force et la même caractéristique, mais lorsqu'elles sont de force inégale et que leurs caractéristiques diffèrent quelque peu, il y a à craindre un renversement de polarité dans une machine et une production de force contre-électromotrice.

Pour éviter cet inconvénient, on réunit, comme l'indique la figure 95, les enroulements en série des dynamos A et B, par un

fil d'équilibre qui empêche le renversement de l'excitation dans la seconde dynamo, par suite de la division du courant entre les deux inducteurs.

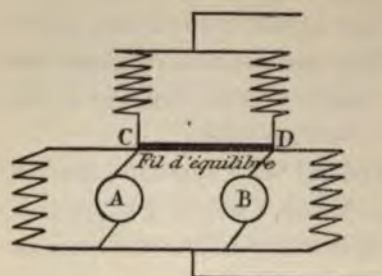


Fig. 95.

L'usage général était, il y a quelques années, d'employer des balais en métal; ceux-ci avaient le grand inconvénient d'user très rapidement les collecteurs, et on n'emploie plus aujourd'hui que des balais en charbon qui donnent de meilleurs résultats.

Nous ajouterons enfin que, pour résister aux variations d'effort qui se produisent dans les dynamos génératrices, il est indispensable que celles-ci soient très robustes et reposent sur des fondations très solides et très stables. Les paliers de support des axes des induits doivent être à grande surface et maintenus constamment dans un état de lubrification aussi parfait que possible. Pour les dynamos de grande puissance, on emploie souvent trois paliers de support au lieu de deux.

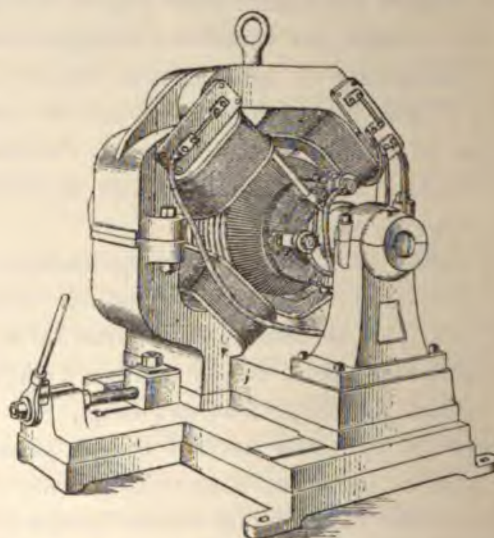


Fig. 96. — Dynamo génératrice de Thomson-Houston.

Il serait impossible de décrire les différents types de dynamos génératrices en usage pour la traction électrique; ils sont trop nombreux et cela nous ferait sortir du cadre de cette étude. On en trouvera d'ailleurs la description dans les ouvrages qui traitent spécialement de la question des dynamos.

Nous pensons toutefois qu'il est intéressant de donner la vue d'ensemble de trois types qui ont reçu des applications nombreuses, soit en Europe, soit en Amérique.

La figure 96 représente le type adopté par la Compagnie Thomson-

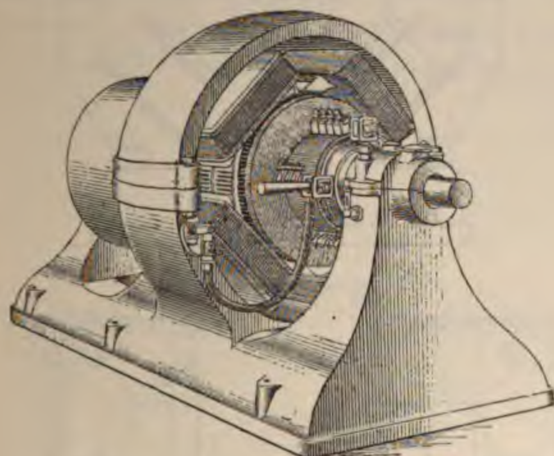


Fig. 97. — Dynamo génératrice Walker.

Houston, la figure 97, celui adopté par la Compagnie Walker, et enfin la figure 98, le type Brown.

Moteurs à vapeur. — Par suite de l'emploi de dynamos génératrices multipolaires à vitesse relativement réduite, il est possible de commander celles-ci directement par l'arbre de la machine à vapeur, ou tout au moins par une courroie ou par des cordes en chanvre ou en coton, reliant directement la grande poulie fixée sur l'arbre de la machine à vapeur avec celle calée sur l'arbre de la dynamo. Cette disposition réduit les frottements résultant des commandes intermédiaires et augmente le rendement mécanique entre les cylindres de la machine à vapeur et la dynamo.

On emploie comme type de machines à vapeur, soit des ma
verticales, genre pilon, soit, plus généralement, des ma
horizontales dont l'entretien et la surveillance sont plus f

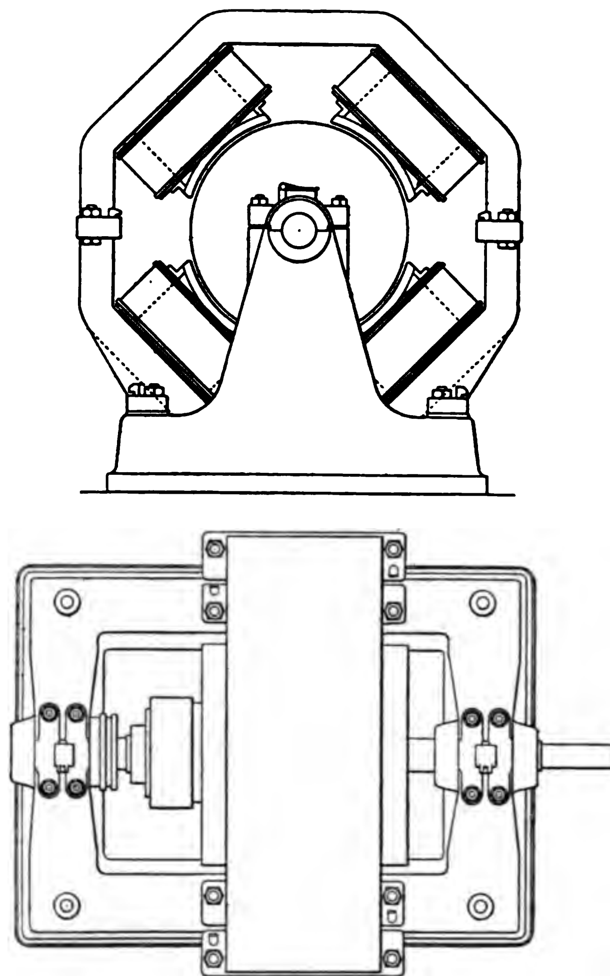


Fig. 98. — Dynamo génératrice Brown.

Pour les réseaux moyens, on préfère les machines à vapeu
seul cylindre, à cause des variations assez fortes dans les eff
produire et qui exigent de grandes variations dans les admi
de vapeur dans les cylindres. Mais lorsque les unités sont gr
et que les variations d'effort sont faibles, on emploie des ma

compound à double et triple expansion. Généralement toutes ces machines ont des distributions du type Corliss.

Comme il est indispensable que les dynamos génératrices aient une vitesse constante, il faut que la machine à vapeur conserve également une vitesse constante, quelle que soit la charge. Elle doit donc être munie de régulateurs très sensibles et de volants très lourds. La rupture de ces derniers pouvant être la cause d'accidents graves, on a remplacé, dans ces derniers temps, en Amérique, la jante en fonte de ces volants par des bandes d'acier rivées ensemble qui présentent plus de sécurité.

Nous ajouterons enfin qu'il y a tout avantage à condenser la vapeur, dans le but de diminuer la consommation de charbon et,

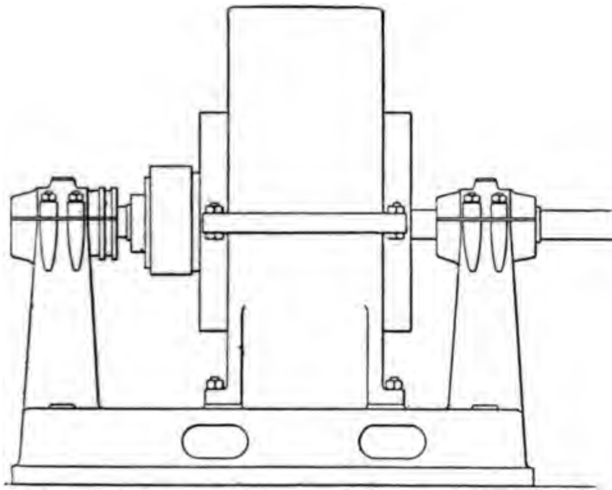


Fig. 98. — Dynamo génératrice Brown.

par suite, de réduire le prix du kilowatt à son minimum, ce qui est en somme le but principal à atteindre. C'est pour cela, comme nous l'avons dit plus haut, qu'il y a intérêt à installer l'usine centrale dans un endroit où l'on puisse obtenir l'eau sans difficulté ni grands frais, et, autant que possible, sans épuration préalable.

Chaudières à vapeur. — Il faut donner aux chaudières une

grande puissance de production de vapeur, afin de pouvoir faire face à la surproduction résultant des variations possibles du trafic à certains moments.

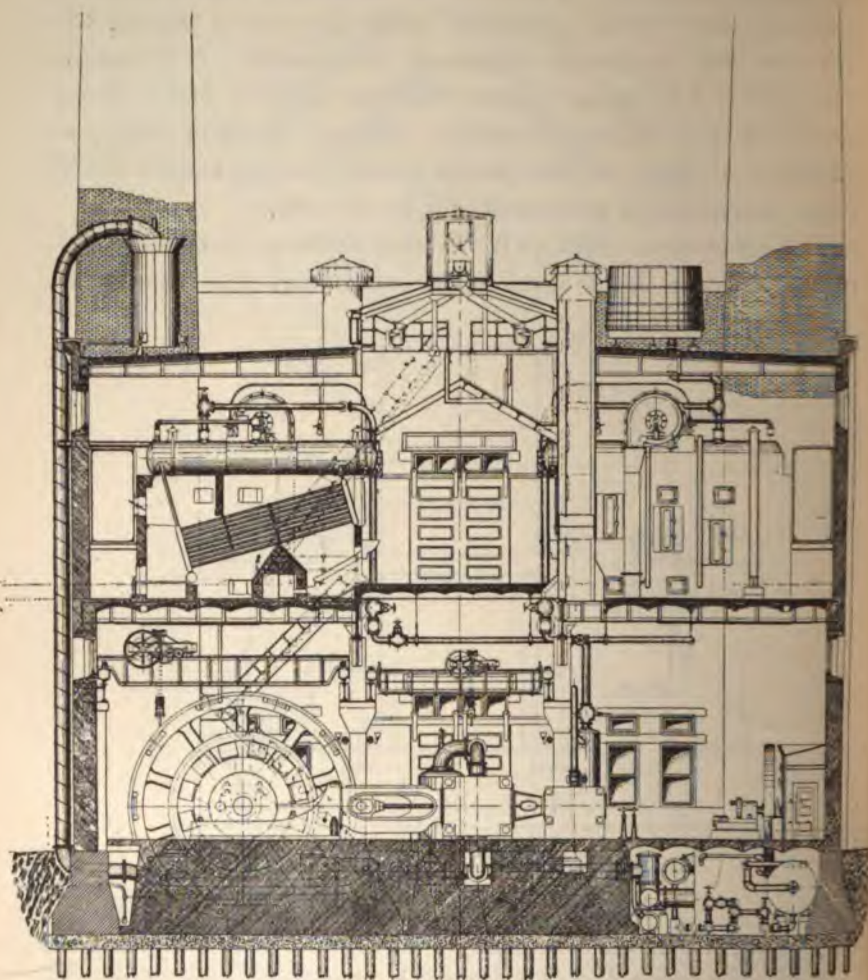


Fig. 99.
Installation de la *People's Traction C°* à Philadelphie.

Dans un but économique, on réchauffe généralement l'eau avant son admission dans la chaudière, au moyen de différents appareils qui se ramènent tous à un système de tuyaux traversés par l'eau

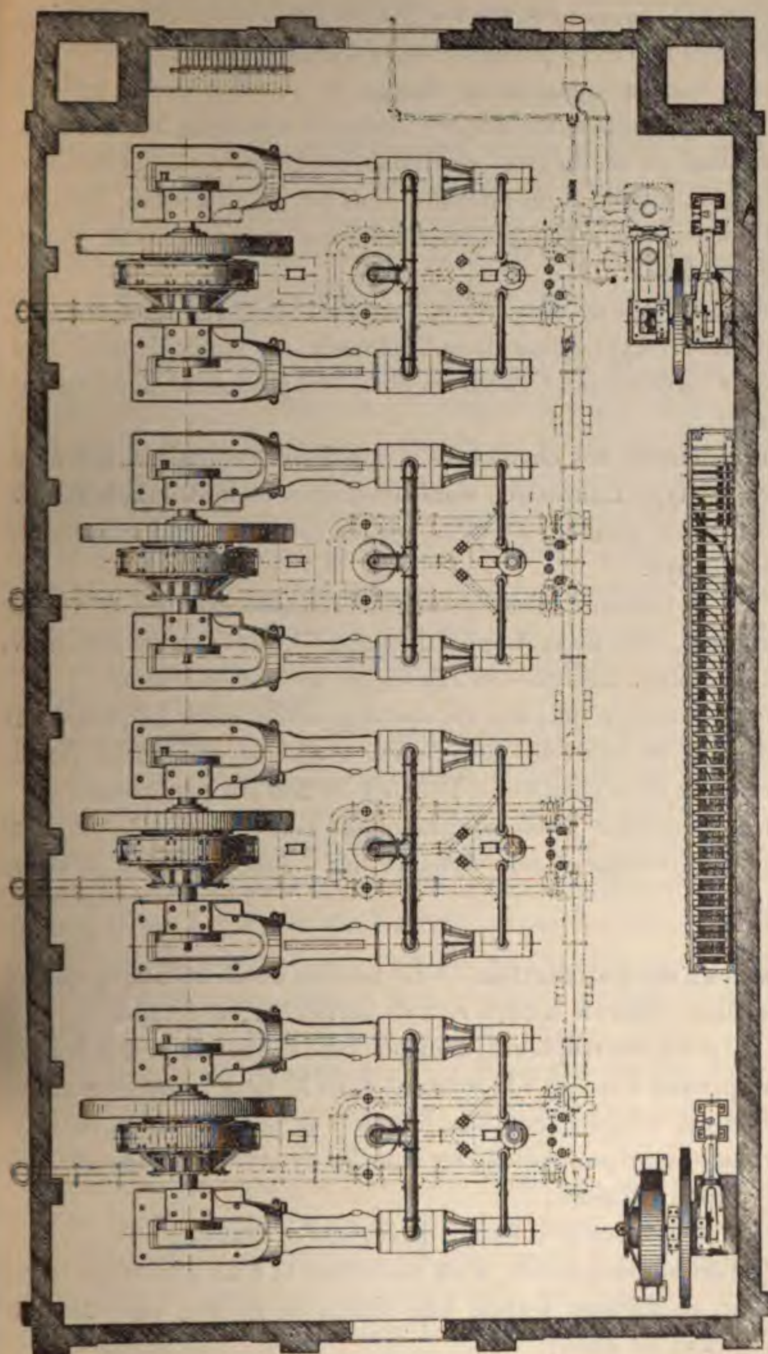


Fig. 99. — Installation de la *People's Traction Cº* à Philadelphie.

et léchés extérieurement par les gaz de combustion allant à la cheminée : ces appareils portent le nom d'*économiseurs*.

Il est aussi avantageux de charger le charbon sur la grille au moyen d'appareils automatiques ; avec ces appareils la combustion se fait dans de meilleures conditions, les gaz sont mieux brûlés et on évite la fumée. Nous citerons, dans cet ordre d'idées, les appareils Vicars, très répandus en Angleterre et qui donnent d'excellents résultats.

Quant au type de chaudières, on peut employer tous ceux qui trouvent leur application dans l'industrie. Le choix dépend d'une foule de circonstances spéciales et de l'emplacement dont on peut disposer.

On rencontre des chaudières à bouilleurs ordinaires, des chaudières du type Lancastre, semi-tubulaires et multitubulaires. Le choix est une question d'espèce qui n'a rien de spécial à la traction des tramways.

Avant de terminer, nous donnerons, comme exemple de grande installation, celle de la *People's Traction C°*, sur l'avenue Delaware, à Philadelphie. La figure 99 représente cette installation.

Les chaudières, qui, suivant une disposition assez fréquente aux États-Unis, se trouvent au premier étage, se composent de six batteries de deux chaudières Babcock de 250 chevaux chacune.

Trois machines tandem compound, genre Corliss, actionnent chacune directement une dynamo de 1 500 kilowatts à douze pôles.

Tableau de distribution. — Le tableau de distribution, dont la disposition générale n'offre rien de particulier, se compose :

1° De deux interrupteurs, l'un pouvant se manœuvrer à la main et qui permet d'envoyer le courant dans la ligne ; l'autre automatique et qui coupe le courant, lorsqu'il se produit sur la ligne un court-circuit qui pourrait causer dans les dynamos un courant d'une trop grande intensité ;

2° D'un rhéostat permettant de régler l'excitation ;

3° D'un ampère-mètre, d'un voltmètre et d'un wattmètre enregistreur, ce dernier destiné aux constatations des variations de puissance et de débit ;

4° Enfin d'un parafoudre destiné à mettre les appareils à l'abri de la foudre, dans le cas où celle-ci tomberait sur les fils du trolley.

Combinaison des accumulateurs et des dynamos dans les stations centrales. — Nous savons que, lorsque le nombre des voitures en circulation est peu considérable, les variations d'effort des dynamos génératrices sont importantes et atteignent quelquefois le double et même plus de la puissance moyenne.

En outre de la diminution du rendement des dynamos qui en résulte, on se trouve obligé de leur donner la puissance maximum à produire, et par conséquent double au moins de la puissance moyenne. Dans le but d'éviter cet inconvénient, on a songé, comme dans le cas de l'éclairage électrique, à employer des accumulateurs qui, placés dans le circuit et agissant comme volant, ont pour but de venir en aide aux dynamos, lorsque la puissance à produire dépasse la puissance moyenne, et qui, à leur tour, seront rechargés, lorsque la puissance à produire sera inférieure à la puissance moyenne de ces dynamos.

Cette disposition a été appliquée aux tramways de Fontainebleau, et nous allons en donner la description, d'après la note publiée par M. Maréchal dans son ouvrage sur les tramways électriques.

Sur le circuit des accumulateurs CD (fig. 100) est intercalée une dynamo F dont les inducteurs portent deux enroulements d'effet opposé. L'un, EF, est pris en dérivation sur les accumulateurs ; l'autre, GH, est traversé par la totalité du courant envoyé dans la ligne. Ces deux enroulements sont combinés de telle façon que, lorsque les machines travaillent à pleine charge, la force électromotrice de la dynamo auxiliaire F, ajoutée à la tension de distribution, fasse équilibre à la force électromotrice des accumulateurs.

Donc, à ce moment, la batterie ne débite ni ne reçoit aucun courant. Si un certain travail devient disponible, le courant diminuera dans GH. L'enroulement EF prédomine et la dynamo auxiliaire ajoute sa force électromotrice à celle des dynamos de l'usine pour charger les accumulateurs. Inversement, si la demande de

i = intensité du courant pour chaque voiture [1] ;

E = différence de potentiel, ou perte de charge, entre le point d'attache du feeder et l'extrémité de la ligne.

Nous allons chercher la perte de charge E résultant de la circulation, sur chacune des voies, de $\frac{n}{2}$ voitures, les unes circulant dans un sens, les autres dans un sens opposé ; les voitures sont supposées également espacées.

Chaque voie ayant $\frac{n}{2}$ voitures en circulation, la section sera divisée en $\frac{n}{2} - 1 = \frac{n-2}{2}$ parties, et la résistance de chaque partie sera :

$$\frac{R}{\frac{n-2}{2}} = \frac{2R}{n-2}.$$

Comme nous admettons que la première et la dernière voiture sont au repos, au moment considéré, l'intensité du courant dans la première section sera $i\,(n-2)$; dans la seconde partie de la section de $i\,(n-4)$, et ainsi de suite.

La différence de potentiel totale sera donc :

$$E = \frac{2R}{n-2}\, i\, [(n-2) + (n-4) + \ldots\ldots (n-(n-2))] = \frac{4\,Ri}{n-2} \times \frac{n\,(n-2)}{8};$$

$$E = \frac{nRi}{2}.$$

Or nous savons que : $R = \frac{\beta L}{s}$; donc, en remplaçant, nous aurons :

$$E = \frac{n\beta Li}{2s}; \qquad s = \frac{n\beta Li}{2E}; \qquad L = \frac{2\,sE}{\beta ni};$$

[1] Ce chiffre représente l'intensité moyenne du courant dépensé par seconde, par chaque voiture, pour un voyage aller et retour, tous les efforts supplémentaires compris. M. Pélissier, dans une étude publiée dans le numéro du 5 avril 1897 de *l'Eclairage électrique*, donne, pour un réseau à 500 volts, les valeurs suivantes pour cette intensité de courant; elles résultent des débits totaux relevés à l'usine centrale divisés par le nombre de voitures.

Pour une voiture d'un poids de :

5 à 6 tonnes	12 ampères.
6 à 7 —	14 —
7 à 8 —	15,5 —
8 à 9 —	17,0 —
9 à 10 —	18,5 —
10 à 11 —	20,0 —
11 à 12 —	21,5 —
12 à 13 —	23,0 —

La première équation permet de déterminer la perte de potentiel dans une section de longueur donnée, avec une section de fils s et un nombre de voitures n circulant avec une intensité de courant déterminée.

La seconde équation détermine la section s à donner aux fils qui devront alimenter n voitures, circulant sur une longueur L avec une intensité de courant i et une perte de potentiel E.

Enfin, la troisième déterminera la longueur qu'on pourra donner à une section sur laquelle devront circuler n voitures avec des fils de trolley de section s et une chute de potentiel E.

Cette formule s'applique directement à la section BC, où l'alimentation par la station centrale se fait à une extrémité. Pour la section AB, où l'alimentation se fait en un point intermédiaire de cette section, la même formule s'appliquera également, mais en prenant séparément chacune des sections mA et mB auxquelles on donnera les valeurs qui leur appartiennent, comme nombre de voitures en circulation, section de fil, etc...

Dans le cas que nous venons de considérer, nous avons admis que la circulation se faisait dans les deux sens et qu'un même nombre de voitures se trouvait sur la voie montante et sur la voie descendante ; c'est le cas ordinaire des lignes de tramways à deux voies, ou à voie unique avec croisements. Mais on peut avoir également à considérer le cas où plusieurs voitures se suivent et marchent dans le même sens.

Soit n ce nombre de voitures. La section sera divisée en $(n - 1)$ parties et la résistance de chacune sera : $\frac{R}{n-1}$ (fig. 102).



Fig. 102.

L'intensité du courant dans la première partie sera : $i\,(n - 1)$, dans la seconde : $i\,(n - 2)$ et dans la dernière : $i\,[n - (n - 1)]$. La chute totale de potentiel sera donc :

$$E = \frac{R}{n-1}\, i\,[(n-1) + (n-2) + (n-3) + \ldots (n - (n-1))]$$
$$= \frac{R}{n-1}\, i \times \frac{n\,(n-1)}{2} = \frac{nRi}{2};$$

comme dans le cas précédent.

Lorsque les sections ont une certaine longueur, il peut arriver que le calcul conduise à des dimensions de fils de trolley dépassant celles admises dans la pratique ; car on n'emploie pas de fils dépassant 9 mm. de diamètre. Il faut alors raccourcir la longueur des sections, calculer, au moyen des formules précédentes, les longueurs à admettre pour le fil qu'on a choisi avec la circulation donnée et alimenter cette section au moyen d'un feeder. Quelquefois aussi, surtout lorsque les sections sont très chargées, on emploie des *distributeurs* ou fils parallèles aux fils du trolley, placés, soit extérieurement sur les colonnes de support, soit dans des caniveaux souterrains. Ces distributeurs (fig. 103) sont reliés,

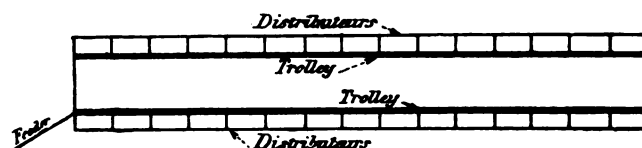


Fig. 103.

de place en place, aux fils du trolley et la section totale des distributeurs et des fils de trolley doit être égale à la section donnée par les formules précédentes.

2° *Section des feeders.* — L'intensité du courant à fournir par le feeder sera égale à l'intensité totale à fournir aux fils de trolley, pour l'alimentation des voitures dans la section considérée ; elle sera donc facile à déterminer. Soit I cette intensité totale.

La chute de potentiel ou perte de charge à l'extrémité du feeder, à sa jonction avec les fils de trolley, sera : E = RI. Or :

$$R = \frac{\beta L}{S}; \qquad \text{donc } E = \frac{\beta LI}{S} \text{ et } S = \frac{\beta LI}{E};$$

L étant la longueur du feeder depuis la station centrale.

Cette formule permettra de déterminer les dimensions à donner aux feeders, lorsque la perte de charge à admettre pour ces feeders aura été déterminée.

La section à donner aux feeders et aux fils de trolley est basée, dans les calculs que nous venons de donner, sur la perte de poten-

tiel à admettre entre les deux extrémités de ce fil. Il est donc utile de déterminer cette perte.

Généralement, on admet une perte totale de 1/10e entre les deux bornes de la génératrice, soit 50 volts pour un voltage de 500 volts, voltage à peu près général pour les tramways.

Mais cette chute totale de potentiel est à répartir entre le feeder, les fils de trolley et le conducteur de retour, qui est le plus généralement formé par les rails. Nous verrons que, dans le but d'éviter les effets électrolytiques qui se produisent dans les rails sous l'influence des courants de retour, la chute de potentiel dans ceux-ci ne doit jamais dépasser 5 volts, ce qui, pour un voltage de 500 volts et une perte de potentiel de 50 volts, correspond au 1/10e de cette perte.

Soit donc : m la part de chute de potentiel qui devra être prise par le feeder ; m', celle à répartir par les fils de trolley ; n, la variation de perte de potentiel dans les fils de trolley, résultant des démarrages ou efforts supplémentaires, pouvant faire varier m' depuis 1,5 jusqu'à 4 fois sa valeur normale, suivant le nombre de voitures en circulation.

Nous pouvons écrire :

$$mE + m'nE + \frac{E}{10} = E;$$

d'où :

$$m' = \frac{9 - 10\,m}{10\,n}.$$

Cette formule nous donnera donc la chute de potentiel à admettre pour les fils de trolley et nous permettra, par suite, d'en calculer les dimensions au moyen des formules précédentes.

Admettons, comme exemple, que la chute de potentiel dans le feeder soit le 1/10e de la chute totale de 50 volts $= m$; que les variations d'efforts dues aux démarrages, etc., soient de $2{,}5 = n$, nous aurons :

$$m' = \frac{9 - 10 \times 0{,}1}{10 \times 2{,}5} = 0{,}32.$$

Nous avons donc la répartition suivante :

Feeder	50 v. × 0,1	=	5 volts.
Trolley	50 × 0,32 × 2,5	=	40 —
Rails de retour	50 × 0,1	=	5 —
Chute de potentiel totale			50 volts.

Cette condition de limiter la chute de potentiel dans le calcul des fils de trolley est d'une très grande importance pour la régularité de la marche des voitures ; c'est même assez souvent cette seule base qui sert à en déterminer les dimensions.

Toutefois, il y a une autre condition à remplir, qui elle aussi a sa valeur ; il s'agit de la question « économique ». La section des fils de trolley doit être telle que la dépense nécessaire pour la transmission de l'énergie au travers de ces fils, plus l'amortissement du capital engagé pour leur établissement, soit un minimum.

Il s'agit de l'application aux fils de trolley de la formule connue sous le nom de « Formule de Lord Kelvin », et que nous croyons devoir rappeler sous sa forme primitive.

Cette formule exprime que la *dépense d'exploitation* est la somme des dépenses d'amortissement du conducteur et d'énergie dépensée dans ce même conducteur ; cette dépense totale doit être rendue minimum.

La dépense d'énergie dans le conducteur est :

$$Ri^2t = \beta \frac{L}{S} i^2t ;$$

t représentant la durée annuelle du temps pendant lequel le courant a circulé dans le fil. Si p représente le prix du watt-heure, la dépense totale pour la transmission de l'énergie sera :

$$p\beta \frac{L}{S} i^2t ;$$

Le prix de la canalisation de longueur L et de section S se composera : d'un terme a fixe, représentant par unité de longueur le prix des supports, de la pose, etc., et d'un terme mS, où m représente le prix de l'unité de section et de l'unité de longueur du fil employé.

Ce prix de la canalisation sera donc :

$$(a + mS)L ;$$

et en représentant par α le taux d'amortissement de ce fil, on aura pour la dépense totale d'exploitation :

$$A = (a + mS)\,\alpha L + p\beta \frac{L}{S} i^2t.$$

En cherchant la valeur de S qui rendra cette valeur minimum, nous aurons :

$$S = i\sqrt{\frac{\beta tp}{ma}}.$$

Telle est la formule de Lord Kelvin.

Pour établir cette formule, on admet une intensité de courant i constante pour toute la longueur du câble ; elle est donc applicable pour le calcul des feeders. Mais, lorsqu'il s'agit de fils de trolley, la mobilité de la charge entraîne des variations d'intensité dans le courant, suivant les positions de cette charge. Il est donc nécessaire de chercher la valeur de i qui, dans ce cas, devra être substituée dans la formule.

Nous suivrons pour la détermination de cette valeur la marche indiquée par M. Pélissier dans son étude publiée dans le numéro du 3 avril 1897 de l'*Éclairage électrique.*

Nous avons vu plus haut que, lorsqu'il s'agit d'un ou de deux fils de trolley alimentant une série de voitures, les unes marchant dans un sens, les autres en sens contraire, la chute totale de potentiel était représentée par la formule :

$$\frac{2R}{n-2}\, i\,[(n-2) + (n-4) + \ldots\ldots n - (n-2)] = E.$$

La dépense en énergie sera :

$$\frac{2R}{n-2}\, i^2\,[(n-2)^2 + (n-4)^2 \ldots\ldots + (n-(n-2)^2] = Ri^2\,\frac{n(n-1)}{3}.$$

Nous aurons donc à substituer à la valeur de i dans la formule de Kelvin la valeur :

$$i\sqrt{\frac{n(n-1)}{3}},$$

et nous aurons définitivement :

$$S = i\sqrt{\frac{\beta tpn\,(n-1)}{3\,m\alpha}} \qquad n = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3\,m\alpha S^2}{\beta pti^2}}$$

Cette formule nous donnera la section de fil la plus économique, au point de vue de la dépense d'exploitation. On aura ensuite à vérifier, au moyen de la formule précédente : $e = \frac{nRi}{2}$,

si, étant donnée la section du fil ainsidé terminée, la chute de potentiel restera dans les limites fixées. Généralement, en pratique, on calcule la section suivant les deux méthodes et on choisit la section maximum.

Le conducteur d'énergie électrique doit encore satisfaire à une troisième condition : le courant ne doit pas échauffer outre mesure le conducteur. Mais nous ajouterons que, lorsque celui-ci satisfait aux deux premières conditions, la troisième est toujours remplie ; il n'y a donc pas à s'en pré occuper.

Exemple. — Soit une ligne de tramway à deux voies et de deux kilomètres de longueur, à trafic très intense, c'est-à-dire ayant 5 voitures montantes et 5 descendantes, soit en tout 10 voitures, l'espacement de celles-ci étant, par conséquent, de 500 m. Chaque voie est alimentée par un fil de trolley en bronze siliceux de 8,25 mm. de diamètre (section = 68,06 mm².), et les deux fils de trolley sont reliés à l'usine centrale par un feeder dont la longueur est de 4 km.

Il s'agit de déterminer, en employant les deux méthodes dont nous venons de parler, la section à donner au distributeur, dans le cas où celle des fils de trolley serait insuffisante, ainsi que la section du feeder.

Première méthode, basée sur la chute de potentiel. — Nous admettrons une chute de potentiel totale aux bornes de la génératrice de 50 volts, le voltage étant de 500 volts.

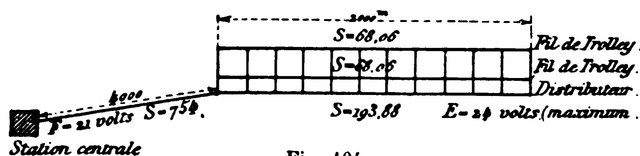


Fig. 104.

Nous admettrons également que la chute de potentiel, dans les rails qui forment courant de retour, ne dépasse pas 5 volts et que la même chute de potentiel dans le feeder sera les 0,42 de la chute totale.

La chute de potentiel à admettre dans les fils de trolley sera donc, d'après la formule que nous avons donnée :

$$m' = \frac{9 - 10 \times 0{,}42}{10 \times 2} = 0{,}24\,;$$

en supposant que, dans ce cas, les variations dues aux démarrages et aux efforts supplémentaires soient égales à 2. Cette chute de potentiel sera donc de 12 volts et pourra être portée au maximum à $12 \times 2 = 24$ volts.

La répartition de la chute de potentiel sera donc la suivante :

Feeder	$0{,}42 \times 50$	=	21 volts.
Fils de trolley	$0{,}24 \times 50 \times 2$	=	24 —
Rails		=	5 —
Chute totale			50 volts.

La section des fils d'alimentation des voitures (trolley et distributeur) sera déterminée par la formule donnée précédemment :

$$S = \frac{n\beta L i}{2\,E}\,;$$

dans laquelle :

n = nombre de voitures en circulation = 10 ;

β = 0,022, résistance spécifique du bronze siliceux ;

L = 2 000, longueur de la section ;

i = intensité moyenne du courant par voiture, que nous supposerons être de 18 ampères ;

E = 12, chute de potentiel dans les fils d'alimentation.

$$S = \frac{10 \times 0.022 \times 2\,000 \times 18}{24} = 330 \text{ mm}^2.$$

Les deux fils de trolley ayant une section de $68{,}06 \times 2 = 136{,}12$ mm², la section à donner au distributeur sera de :

$$330 - 136{,}12 = 193{,}88 \text{ mm}^2$$

La section du feeder se déterminera au moyen de la formule donnée plus haut :

$$S = \frac{\beta L i}{E}$$

β = 0,022, résistance spécifique du bronze siliceux ;

L = 4 000, longueur du feeder ;

E = 21 volts, comme il est indiqué plus haut ;

i = 180 ampères, correspondant à 10 voitures, consommant chacune 18 ampères.

$$S = \frac{0{,}022 \times 4\,000 \times 180}{21} = 754 \text{ mm}^2$$

Deuxième méthode, basée sur la dépense minimum d'exploitation. — Nous allons (fig. 105) d'abord calculer la section des fils

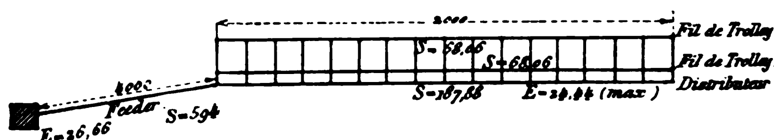


Fig. 105.

conducteurs (fils de trolley et distributeur) au moyen de la formule :

$$S = i\sqrt{\frac{\beta tpn\,(n-1)}{3\,m\alpha}};$$

i = intensité du courant par voiture comme ci-dessus = 18 amp.

β = 0,022, résistance spécifique ;

t = temps annuel, en secondes, pendant lequel le courant devra circuler dans le conducteur. Nous supposerons un service de 18 heures par jour ; nous aurons donc :

$$t = 18 \times 365 \times 3\,600 = 23\,652\,000 \text{ secondes}$$

p = prix du watt par seconde. Nous admettrons que le prix du kilowatt-heure est de 0,15 fr. ; nous aurons :

$$p = \frac{0{,}00015}{3\,600} = 0{,}000000042$$

m = 0 fr. 02, prix de l'unité de longueur et de l'unité de section du conducteur.

α = 0 fr. 2, amortissement par franc du conducteur.

$$S = 18\sqrt{\frac{0{,}022 \times 23\,652\,000 \times 0{,}000000042 \times 10\,(10-1)}{3 \times 0{,}02 \times 0{,}1}} = 324 \text{ mm}^2.$$

Les deux fils du trolley ayant une section de $68{,}06 \times 2 = 136{,}12$. la section à donner au distributeur sera de :

$$324 - 136{,}12 = 187{,}88 \text{ mm}^2$$

La chute de potentiel, résultant de cette section de conducteur, sera donnée par la formule :

$$E = \frac{n\beta Li}{2S} = \frac{10 \times 0{,}022 \times 2\,000 \times 18}{2 \times 324} = 12{,}22 \text{ volts.}$$

qui sera, au maximum, de $12{,}22 \times 2 = 24{,}44$ volts.

Le calcul des feeders se fera au moyen de la formule ordinaire de Lord Kelvin :

$$S = i\sqrt{\frac{\beta lp}{m\alpha}}$$

$i = 180$ amp. correspond à 10 voitures consommant, chacune 18 ampères.

$$S = 180\sqrt{\frac{0{,}022 \times 23\,652\,000 \times 0{,}000000042}{0{,}02 \times 0{,}1}} = 594 \text{ mm}^2$$

La perte de potentiel dans le feeder sera de :

$$E = \frac{\beta Li}{S} = \frac{0{,}022 \times 4\,000 \times 180}{594} = 26{,}66 \text{ volts.}$$

La chute totale de potentiel aux bornes de la génératrice sera donc de :

Feeder		26,66 volts.
Conducteurs	12,22 × 2 =	24,44 —
Rails		5,00 —
Total		56,10 volts.

La chute totale dépasserait donc la limite fixée de 50 volts et la section du feeder devrait être un peu augmentée. Il y aurait peut-être intérêt, dans ce cas, à prendre la section du feeder trouvée par la première méthode, en conservant celle des conducteurs (trolleys et distributeur).

Nous avons admis, dans tout ce qui précède, que chaque tronçon composant la ligne de tramways était complètement isolé des tronçons voisins. C'est évidemment un avantage, puisque, en cas d'accident, ce tronçon seul se trouve atteint et que la circulation

peut continuer sur les autres ; il en est de même en cas de réparations.

Mais lorsque, par suite d'une circulation exceptionnelle, il vient à se produire un encombrement sur ce tronçon, l'intensité du courant à fournir augmente, ainsi que la chute de potentiel, et le rendement des dynamos génératrices diminue.

Aussi, dans ces derniers temps, a-t-on pris l'habitude, lorsqu'il s'agit de réseaux importants, de réunir les tronçons au moyen de fils fusibles ou d'interrupteurs. En temps ordinaire, on peut ainsi profiter de toute la conductibilité des fils, et, en cas d'accident, la section où a lieu le court-circuit est isolée automatiquement ; d'un autre côté, les interrupteurs permettent l'isolement, en cas de réparations.

En outre des fils conducteurs, on réunit également les feeders au moyen de fils fusibles ou d'interrupteurs. Les variations d'intensité du courant se trouvent ainsi diminuées, et, en cas d'encombrement en un point quelconque, tous les feeders alimentent la section ; la marche des dynamos génératrices reste alors dans des conditions satisfaisantes, la tension aux bornes ne subissant plus que de faibles variations.

Quant aux sections à donner aux fils conducteurs et aux feeders, elles se calculent, comme si les tronçons étaient isolés, en suivant les méthodes que nous avons indiquées plus haut ; ces sections pourront alors satisfaire à un accroissement momentané de service.

Ce système de liaison a été appliqué au réseau de tramways de Minnéapolis et de Saint-Paul aux États-Unis, et on trouvera dans le mémoire de M. Pélissier, dont nous avons parlé plus haut, un diagramme qui montre clairement l'influence de son emploi sur les variations de débit des feeders.

Installation des fils aériens. — Nous venons d'indiquer la méthode à suivre pour calculer la section à donner aux différents conducteurs servant à amener le courant aux voitures. Il nous reste à donner quelques renseignements sur l'installation de ces fils aériens.

Conducteurs aériens. — Les premiers tramways électriques se composaient de deux fils aériens isolés, l'un servant de conducteur d'amenée pour le courant, l'autre servant de conduite de retour. C'est la disposition adoptée par MM. Siemens et Halske pour les tramways de Francfort à Offenbach, de Moëdling à Hinterbrust et de Vevey-Montreux.

Les conducteurs étaient formés d'un tube métallique s'appuyant, au moyen d'isolateurs, sur des poteaux espacés en moyenne de 20 m.

Afin de donner de la rigidité à ces tubes, qui sans cela auraient pris une trop grande flèche, on les suspendait à des câbles en

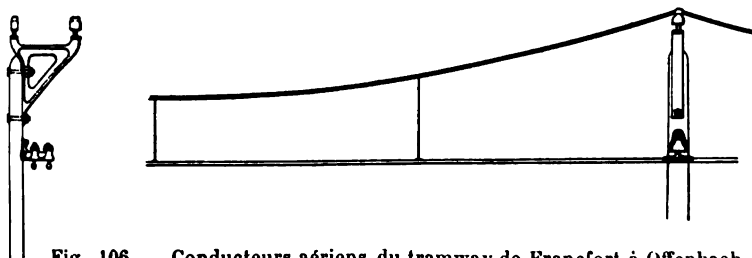


Fig. 106. — Conducteurs aériens du tramway de Francfort à Offenbach.

acier qui reposaient à la partie supérieure des poteaux, par l'intermédiaire d'isolateurs (fig. 106).

Les tubes étaient fendus longitudinalement à la partie inférieure, afin de laisser passer un câble métallique souple qui reliait la toiture de la voiture avec un curseur glissant à l'intérieur du tube métallique ; c'est par l'intermédiaire de ces curseurs que se faisaient la prise et le retour du courant. La figure 107 montre la disposition d'un croisement et d'une aiguille. Les quatre tronçons du tube métallique qui forment le croisement se réunissent à une plaque en bois P, au dessous de laquelle glisse le frotteur. Cette plaque est disposée de

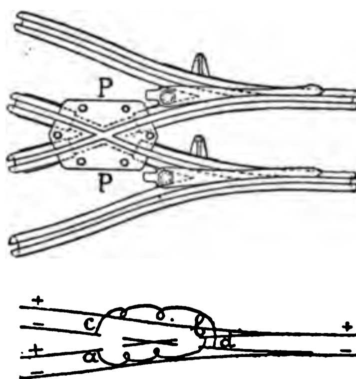


Fig. 107. — Changement et croisement.

telle sorte que, lorsque le frotteur quitte, à l'arrière, le tube métallique, sa partie avant est déjà engagée dans le prolongement de ce tube; il n'y a donc pas d'interruption de courant.

Des aiguilles mobiles, indiquées sur la figure, et qui peuvent se manœuvrer à la main ou par l'intermédiaire de leviers solidaires des aiguilles de la voie, permettent de faire passer le courant dans une direction ou dans l'autre.

Ces appareils de croisement et de changement de voie sont compliqués et très disgracieux; il en est de même des tubes conducteurs de courant. De plus, cette disposition nécessite des supports résistants, par suite des efforts de traction auxquels ces tubes sont soumis, sous l'influence des curseurs. Aussi ce système ne s'est-il pas répandu et a-t-il été remplacé par le système Van Depoele, où les deux conducteurs aériens sont encore conservés, mais sont formés de deux fils de cuivre isolés et parallèles, supportés dans l'axe de la voie à l'aide de haubans et de poteaux; ces fils ont un diamètre de 9 mm. environ.

C'est avec cette disposition de Van Depoele que nous voyons apparaître, pour la première fois, le *trolley* que nous décrirons plus loin. Seulement, comme ici il y a deux conducteurs, le trolley se compose de deux branches et de deux poulies s'appuyant sous chacun des fils conducteurs.

La figure 108 montre la disposition d'un croisement avec ce

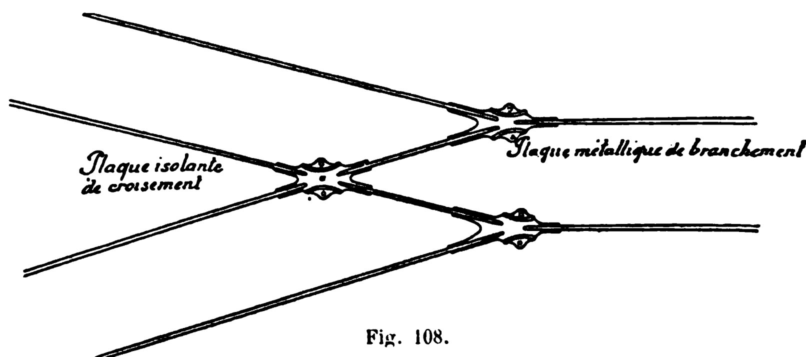


Fig. 108.

Système à deux fils Van Depoele; changement et croisement.

système. L'aiguille est formée par de simples nervures saillantes, à la partie inférieure des plaques en métal formant le bran-

chement. Le croisement se compose d'une plaque isolante au-dessous de laquelle frotte la poulie du trolley, en produisant une courte interruption de courant lorsque celle-ci passe sous la plaque isolante ; cette courte interruption de courant est la cause de chocs qui amènent une usure rapide des engrenages des moteurs de la voiture.

Ce système n'a guère été employé qu'aux États-Unis, au début de la traction électrique; quoique plus simple que le système à double tube, on lui a préféré le système, plus simple encore, à fil unique aérien, avec retour du courant par les rails. C'est le dispositif employé, pour la première fois, en Amérique par MM. Van Depoele et Sprague, et qui est pour ainsi dire le seul admis actuellement pour la traction électrique par conducteur aérien.

Le fil conducteur, qui, comme nous l'avons dit, a un diamètre variant entre 8 et 9 mm., 10 mm. au plus, est suspendu au milieu de la voie au moyen de poteaux ou de haubans transversaux.

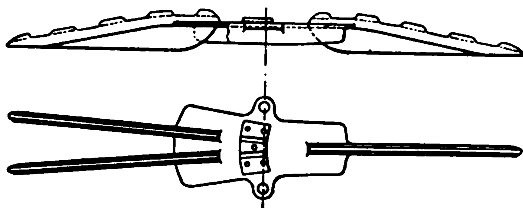


Fig. 109. — Système à un seul fil; changement.

Aux points de changement de direction, les extrémités des fils sont reliées à des pièces spéciales à nervures, dont la disposition est

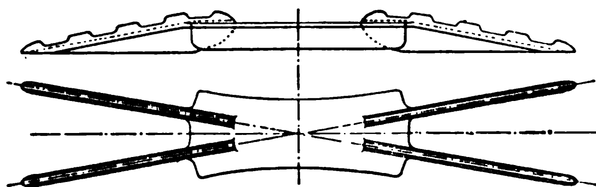


Fig. 110. — Système à un seul fil; croisement.

représentée sur la figure 109 et qui facilitent l'orientation de la poulie du trolley dans la direction voulue.

Dans le système à fil aérien unique, les croisements sont beaucoup moins fréquents, et par suite les interruptions de courant

moins à craindre et l'installation plus simple. La disposition d'un croisement est représentée figure 110.

Le fil du trolley est toujours cylindrique ; cependant, dans ces dernières années, dans le but d'augmenter la surface de contact du fil avec la poulie du trolley, les ingénieurs américains ont fait l'essai de fils conducteurs dont la section a la forme indiquée par la figure 111.

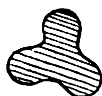


Fig. 111.

Quoique le dispositif dont nous venons de parler en dernier lieu soit le seul employé actuellement, nous croyons intéressant d'indiquer la disposition qui, par suite de circonstances toutes spéciales, a été adoptée pour le tramway de Montferrand à Royat.

Le conducteur aérien est formé d'un tube à section rectangulaire, formé d'une âme en fer et de deux ailettes en cuivre rouge se recourbant vers le bas, en laissant une fente longitudinale (fig. 112).

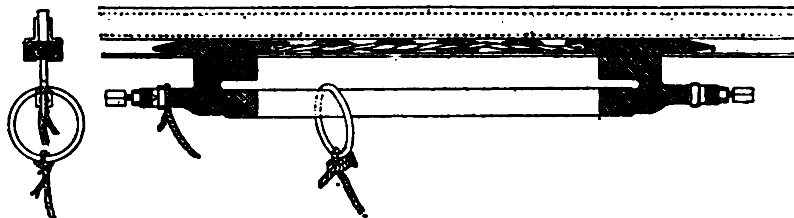


Fig. 112. — Conducteur et curseur du tramway de Montferrand à Royat.

Ce tube est soutenu par un câble en acier et le tout est supporté à l'aide d'isolateurs fixés sur des poteaux métalliques espacés de 50 m. ; cette disposition a beaucoup d'analogie avec celle indiquée figure 106. Un curseur souple en métal est emprisonné dans le tube ; il présente à sa partie inférieure un appendice passant dans la fente longitudinale, auquel sont attachés le câble métallique souple servant à transmettre le courant à la voiture et le cordeau servant spécialement à l'entraînement du curseur. Le retour du courant se fait par les rails de la voie.

Les figures 113 à 115 montrent les dispositions qui peuvent être données aux fils aériens, lorsqu'il s'agit d'avenues ou de voies larges.

Les deux premières figures 113-114 s'appliquent à une double voie avec fils aériens suspendus, soit à des poteaux à double console, soit à un poteau à console simple.

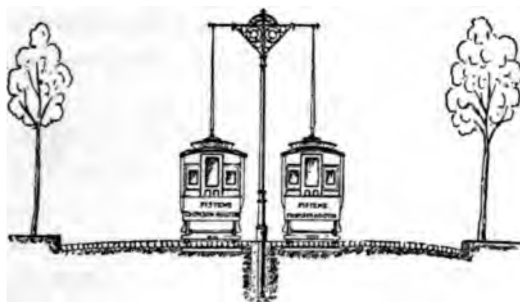


Fig. 113. — Suspension avec double console dans l'axe de la voie.

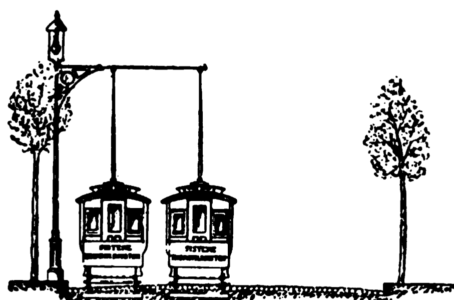


Fig. 114. — Suspension avec double console sur le côté de la voie.

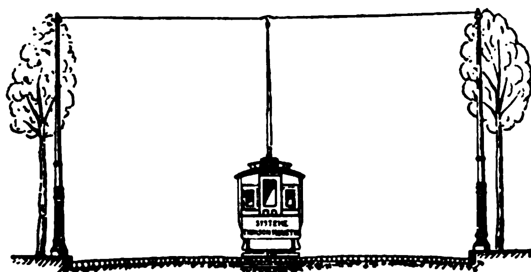


Fig. 115. — Suspension par haubans transversaux.

La figure 115 représente une voie unique avec poteaux en bordure et fil transversal de suspension.

Les fils aériens sont généralement placés à une hauteur moyenne de 7 m. au-dessus du sol, avec un espacement entre les poteaux variant entre 30 et 35 m.

Cet écartement dépend, du reste, du poids P du câble par mètre, de la flèche f qui peut être admise entre les supports et de la tension T qu'on peut donner au métal qui constitue le fil. La formule suivante donne cette relation :

$$L = \sqrt{\frac{8fT}{P}}.$$

Les fils aériens s'emploient par longueurs variant entre 7 et 800 m. Les jonctions entre les différentes sections se font, soit au moyen de manchons dans lesquels viennent s'engager les extrémités des fils et qu'on remplit de soudure, soit au moyen de

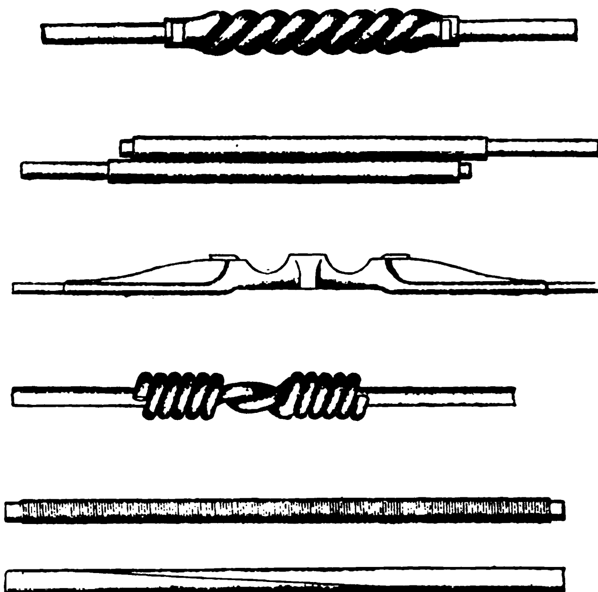


Fig. 116. — Différents systèmes d'épissure des fils aériens.

tendeurs qui permettent de régulariser la longueur, suivant les variations de température, soit enfin en établissant la jonction des fils aux points de support. Aux États-Unis ces jonctions

se font au moyen d'épissures dont les figures 116 montrent les dispositions les plus fréquentes.

La disposition du fil conducteur dans les aiguillages est toujours compliquée, surtout lorsqu'il s'agit du trolley ordinaire, qui exige que le fil soit toujours dans l'axe de la voie.

L'emploi de nombreux tendeurs est nécessaire et leur installation doit varier suivant la disposition des lieux. La figure 117 montre un dispositif pour un aiguillage à courbes de 90°. Les points B et C sont les points d'attache des tendeurs.

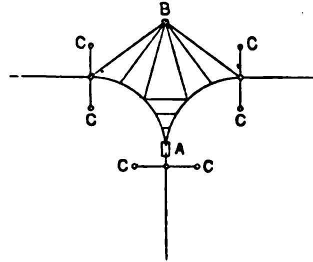


Fig. 117.
Disposition d'un aiguillage.

L'emploi de l'archet que nous décrirons plus loin, au lieu du trolley, simplifie beaucoup les aiguillages.

Suspension des fils aériens. — Les conducteurs aériens peuvent être suspendus au-dessus des voies de trois manières différentes.

1° A l'aide de haubans transversaux avec agrafes dans les murs;

2° A l'aide de haubans transversaux fixés à des poteaux;

3° A l'aide de poteaux consoles.

La figure 118 montre la première disposition. Les haubans sont

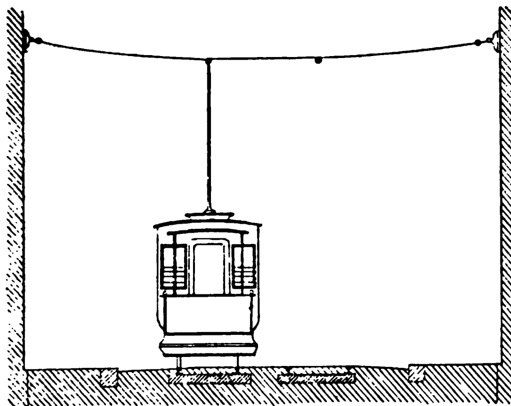


Fig. 118. — Haubans transversaux avec agrafes.

en fils d'acier galvanisé de 5 à 6 mm. de diamètre et sont fixés à des agrafes scellées dans les murs des façades des maisons. La

figure 119 donne la disposition de ces agrafes ; on remarquera le tampon en caoutchouc interposé entre l'agrafe et le hauban, dans

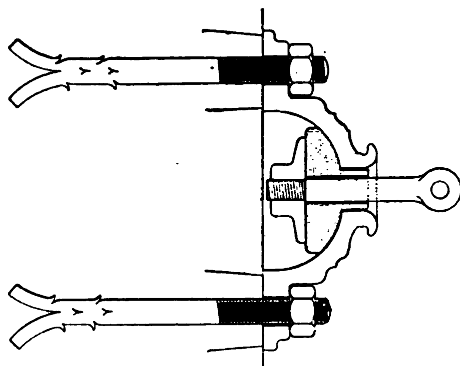


Fig. 119. — Agrafes.

le but de servir d'isolant et, en même temps, d'amortir les vibrations produites par la marche du trolley.

Le conducteur aérien est suspendu aux haubans à l'aide d'iso-

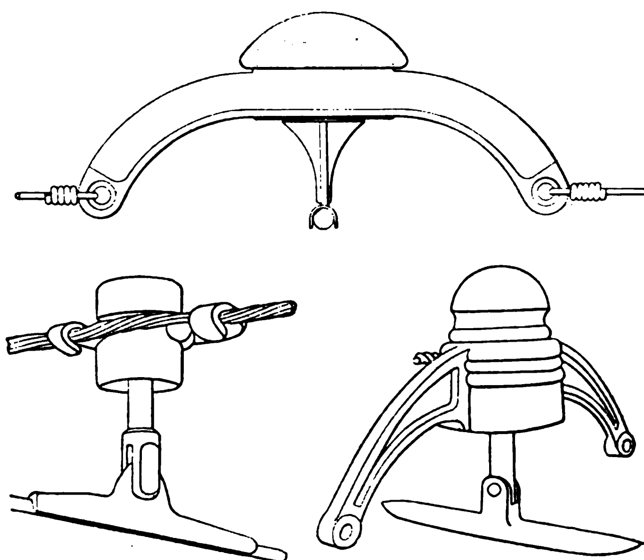


Fig. 120. — Isolateurs.

lateurs dont les types sont très variables. Nous représentons (fig. 120) des modèles assez fréquemment employés.

Nous avons dit qu'en alignement droit les haubans étaient généralement espacés de 30 à 35 m.; mais dans les courbes les points

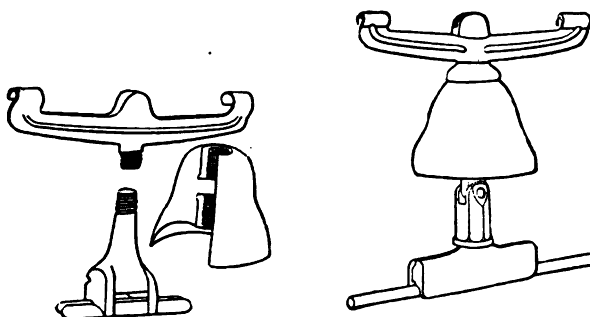


Fig. 120. — Isolateurs.

de support doivent être beaucoup plus rapprochés et il faut alors prendre des dispositions spéciales, ainsi que l'indique la figure 121. Plusieurs haubans, destinés à donner la courbure au fil aérien, sont, dans ce cas, reliés à un seul poteau C, qui lui-

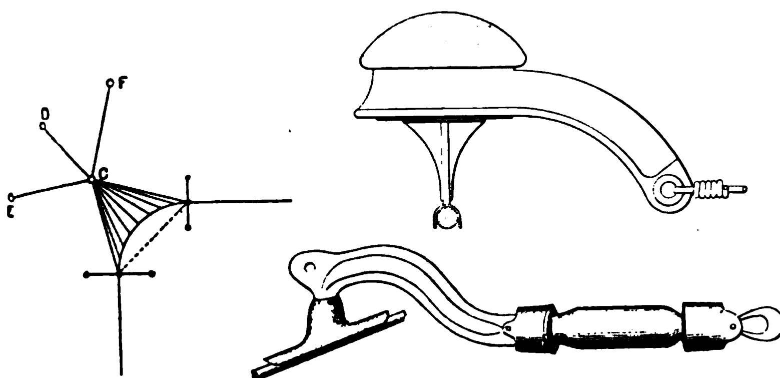


Fig. 121.
Disposition des haubans en courbe.

Fig. 122.
Isolateurs de courbe.

même est maintenu par des câbles latéraux fixés en E, D, F, aux façades des maisons. Les isolateurs ont alors la forme représentée par la figure 122.

La deuxième disposition, c'est-à-dire la suspension à l'aide de haubans et de poteaux latéraux, est représentée par la figure 123. L'installation est la même que celle que nous venons de décrire. L'attache des haubans, au sommet des poteaux,

se fait au moyen d'isolateurs-tendeurs représentés figure 124; ils donnent un double isolement aux fils conducteurs.

La troisième disposition est celle par poteaux-consoles; elle

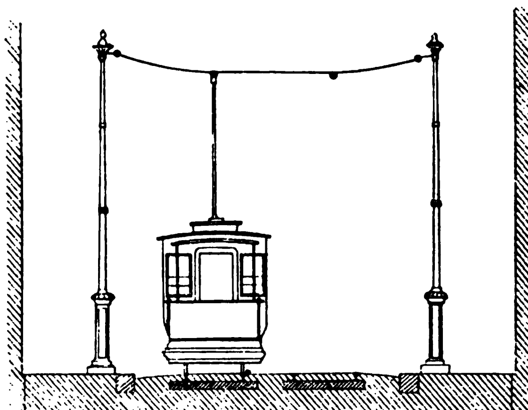


Fig. 123. — Haubans et poteaux latéraux.

est représentée par la figure 125, l'une s'appliquant à deux voies symétriques, l'autre à une voie unique, placée en accotement.

Dans cette disposition les isolateurs sont disposés comme l'indique la figure 126; ils sont fixés sur le bras de la console au moyen de colliers serrés par des boulons.

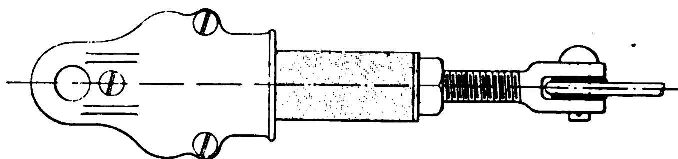


Fig. 124. — Isolateur-tendeur.

La liaison rigide qui existe entre la console et le fil conducteur produit forcément une réaction assez forte lorsque le trolley vient à passer sous la console; elle exige, de plus, l'emploi d'isolateurs de forme spéciale.

Dans le but d'éviter ces inconvénients, la Société Alsacienne a imaginé la disposition représentée sur la figure 127, disposition qui

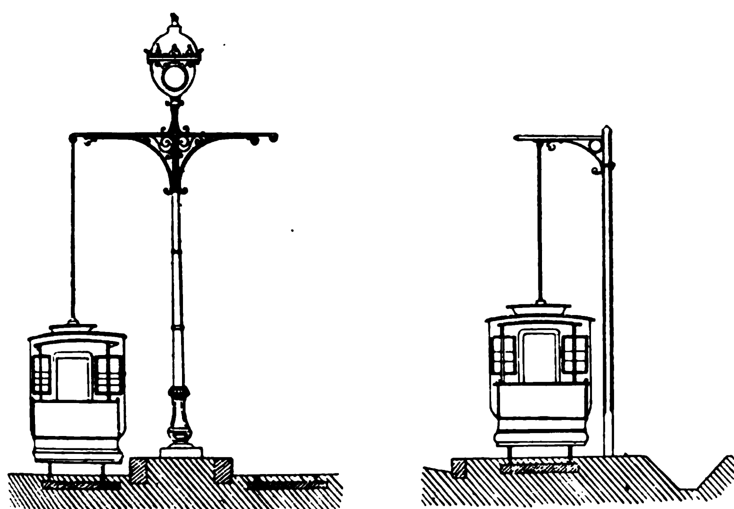


Fig. 125. — Poteaux consoles.

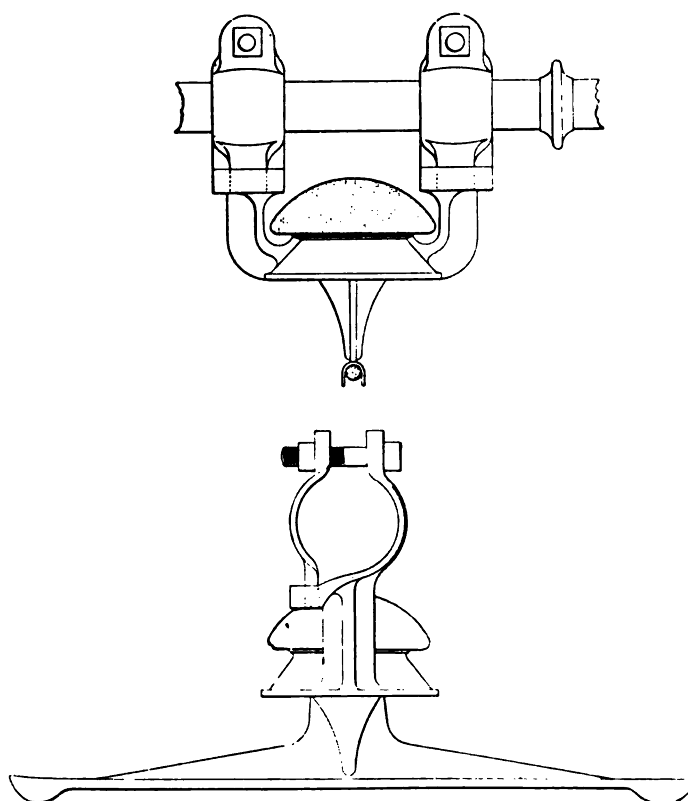


Fig. 126. — Isolateur pour console.

donne une très grande élasticité au fil conducteur au passage des consoles et permet, en même temps, l'emploi d'isolateurs de forme ordinaire. Elle permet également le double isolement, au moyen d'isolateurs-tendeurs semblables à ceux dont nous avons parlé plus haut.

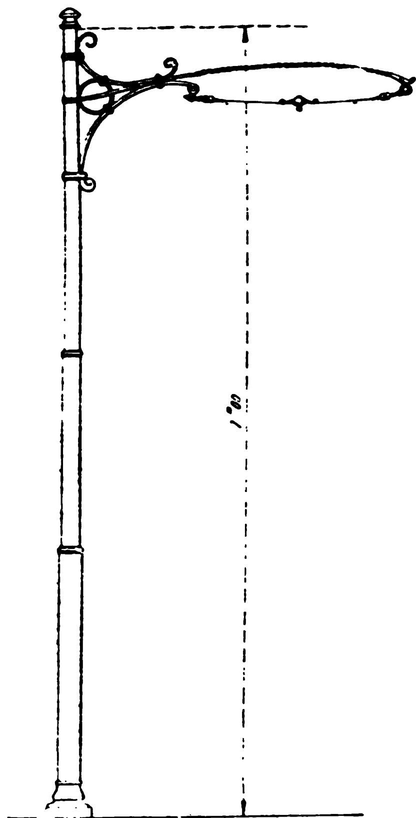


Fig. 127. — Suspension pour console de la Société Alsacienne.

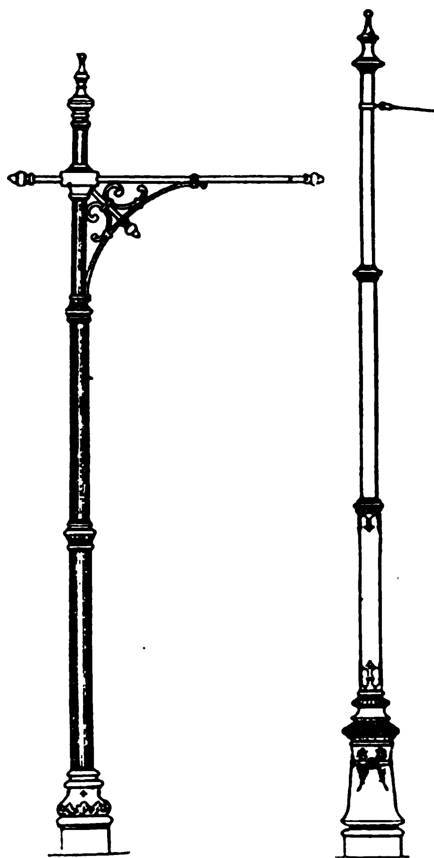


Fig. 128. Colonnes de support.

Colonnes de support. — Les colonnes de support ont en général une hauteur de 7 m. à 7,50 m. au-dessus du niveau du pavage et sont encastrées dans le sol, dans une enveloppe en béton de 1,50 m. de hauteur moyenne. Ces colonnes sont soumises à deux sortes d'efforts : l'un vertical et produit par le poids des haubans et de ses accessoires, l'autre, et le plus important, horizontal et résultant de la traction produite par ces mêmes haubans. Aux États-

Unis, on admet que, sous une traction horizontale, au sommet, de 360 kg., la flèche ne doit pas dépasser 0,10 m. à 0,12 m. et que, sous une traction variant entre 550 et 720 kg., il ne doit en résulter aucune déformation permanente. En France, on semble admettre une flèche de 0,12 m. sous un effort horizontal de 250 kg., comme base de calcul.

En Amérique, les colonnes de support sont souvent en bois ; mais, en Europe, on emploie ordinairement des tubes en acier à section décroissante (fig. 128).

Lorsque les efforts horizontaux deviennent considérables, les sections à donner aux tubes augmentent beaucoup et le poids des colonnes devient alors important. On a essayé, dans ce cas, d'employer des supports en treillis qui coûtent moins cher, mais sont d'un aspect peu décoratif et ne peuvent guère trouver leur emploi qu'en dehors des villes.

Nous citerons, dans cet ordre d'idées, les poteaux à base carrée employés à Lyon sur la ligne de tramways de Saint-Fons, et sur la ligne de Roubaix à Tourcoing (fig. 129).

Ces poteaux sont composés de quatre cornières frettées à chaud sur des contre-frettes.

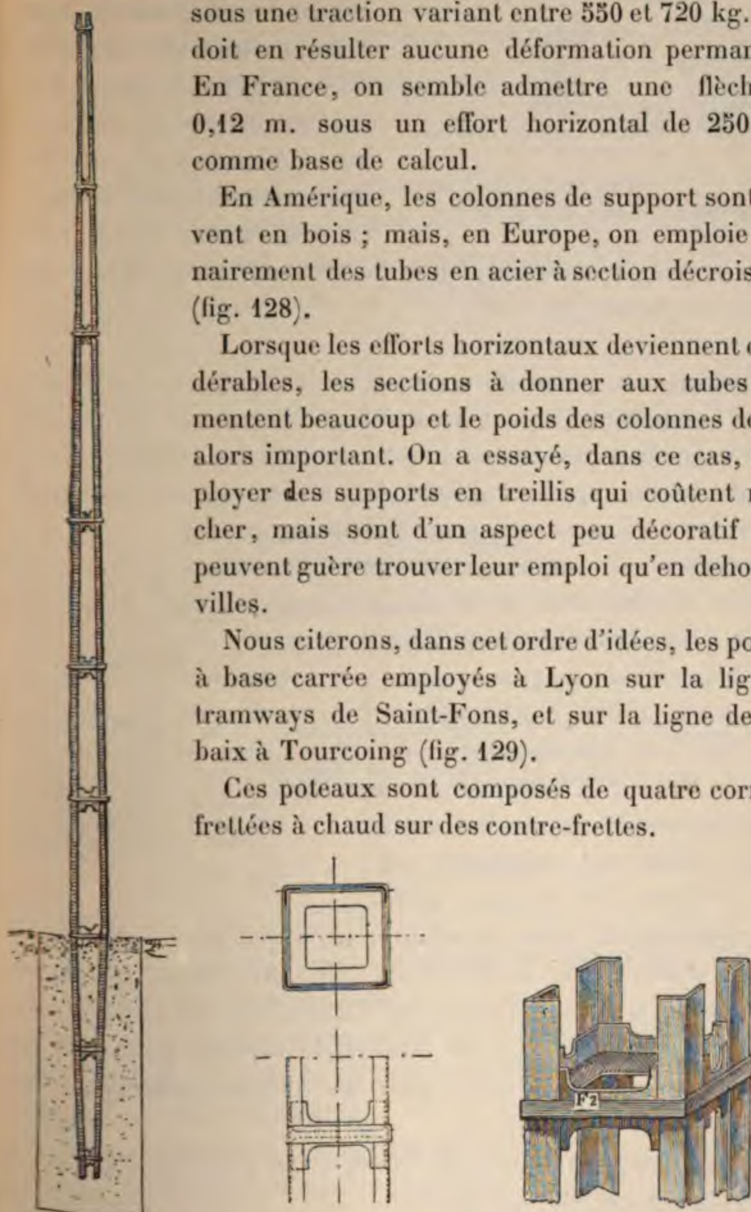


Fig. 129.
Poteaux rectangulaires des tramways de Saint-Fons et de Roubaix à Tourcoing.

Fils de garde. — Ces fils sont destinés à éviter le contact des conducteurs aériens avec les fils télégraphiques ou téléphoniques, lorsqu'ils viennent à casser. Ils sont parallèles aux fils du trolley, placés à 0,50 ou 0,60 m. au-dessus d'eux, et sont soutenus par des haubans isolés.

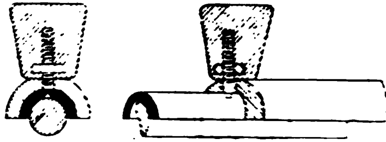


Fig. 130.
Garniture isolante des fils aériens.

Au lieu des fils de garde, on préfère quelquefois isoler les fils aériens eux-mêmes, à leur partie supérieure, en les recouvrant d'un isolant (fig. 130).

Appareils de prise de courant. — Trolleys. — Le courant, produit par la ou les dynamos de l'usine centrale et lancé dans le conducteur aérien, est amené dans les moteurs des voitures par l'intermédiaire d'un appareil spécial de prise de courant, fixé sur la toiture de la voiture et qui porte le nom de *trolley*.

Cet appareil se compose généralement d'une pièce spéciale maintenue en contact avec le fil conducteur aérien, puis d'une tige, soit en bois, soit en métal, d'environ 3 à 4 m. de longueur, la reliant avec la toiture de la voiture. Cette tige est habituellement inclinée de 30° sur la verticale, dans le sens inverse de la marche de la voiture. C'est cet ensemble qui porte le nom de *trolley*, quoique primitivement cette appellation ne s'appliquât qu'à la roulette en contact avec le fil aérien (fig. 131). Nous ajouterons qu'une corde *a*, fixée à l'extrémité du système et mise à portée du conducteur, permet à ce dernier de replacer l'appareil sur le fil aérien lorsqu'il le quitte pour une raison quelconque (manœuvres aux points terminus.

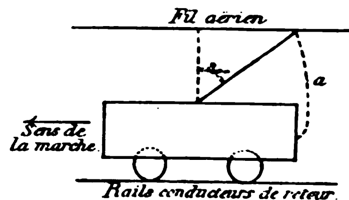


Fig. 131.

Il y a plusieurs systèmes de trolleys, qui peuvent toutefois se diviser en deux grandes catégories :

1° Trolleys à roues ;

2° Trolleys à frottement.

Au début de la traction électrique on se servait, comme nous l'avons vu, d'une sorte de navette glissant à l'intérieur d'un tube creux, formant fil aérien, muni d'une fente longitudinale inférieure ; cette disposition a été complètement abandonnée, quoiqu'on en trouve encore quelques exemples : sur la ligne de Royat-Clermont-Ferrand et sur celle de Vevey à Chillon (fig. 112).

1° Trolleys à roue. — Dans cette disposition la prise de courant sur le fil aérien se fait au moyen d'une roulette en bronze de 0,10 à 0,15 m. de diamètre, munie d'une gorge de 0,02 m. environ. Cette gorge est quelquefois faite en graphite.

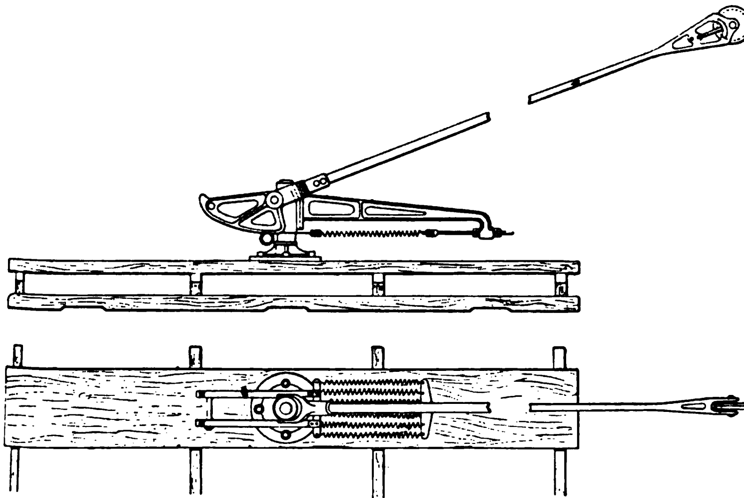


Fig. 132. — Trolley Thomson-Houston.

La figure 132 représente la disposition du trolley employé par la Société Thomson-Houston.

Des ressorts horizontaux agissent, au moyen de secteurs, à l'extrémité inférieure de la tige en fer et forcent la roulette à appuyer fortement sur le fil aérien.

Tout l'appareil est monté sur un axe vertical fixé sur la toiture de la voiture, ce qui facilite le retournement du trolley aux points terminus ; un léger déplacement angulaire dans le sens latéral est possible, mais il est très faible. C'est par l'axe de rotation de la

roulette que le courant pénètre dans la tige en fer, et, ensuite dans les moteurs de la voiture.

La Compagnie de Fives-Lille recueille le courant pris par la roulette, au moyen d'un bloc de charbon pressant par un ressort sur le fond de la gorge de la poulie (fig. 133).

La figure 134 représente une autre disposition assez fréquemment employée aux États-Unis.

Comme on le voit, ces dispositions ne permettent qu'un faible déplacement latéral du trolley; le fil aérien doit donc être forcément placé dans l'axe de la voie.

C'est une condition qu'il n'est pas toujours facile de réaliser et qui quelquefois entraîne des complications coûteuses. Il y avait donc intérêt à étudier une disposition permettant un déplacement latéral assez grand du fil aérien par rapport à l'axe de la voie, déplacement pouvant atteindre même quelques mètres.

Nous citerons, dans cet ordre d'idées, le trolley Dickinson, appliqué pour la première fois aux tramways de South Staffordshire en Angleterre, ensuite à ceux de Bristol et, depuis, à ceux de Montpellier en France.

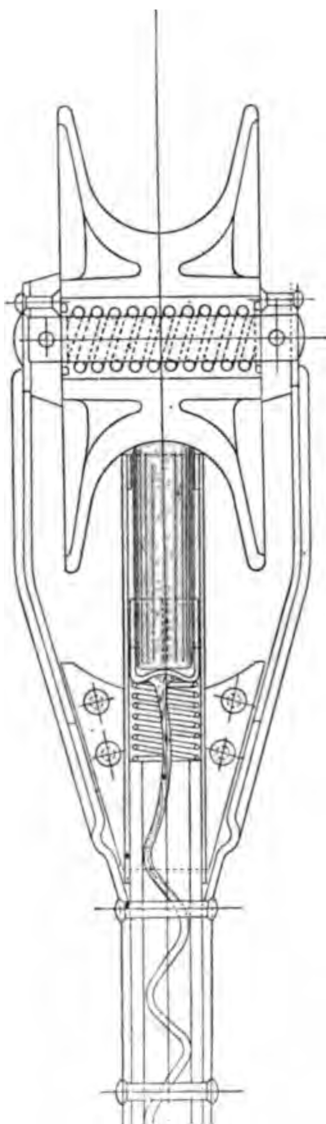


Fig. 133. — Trolley de la C[ie] de Fives-Lille.

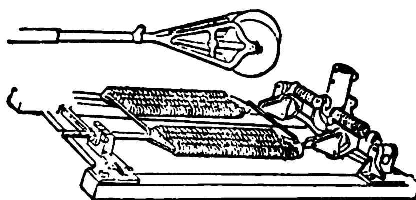


Fig. 134.

La figure 135 représente l'ensemble du trolley Dickinson. La tige verticale fixée sur la toiture de la voiture et représentée en détail sur la figure 136, est mobile autour de son axe ; la tige inclinée en métal qui supporte la roulette et qui est fixée au moyen d'une articulation à la partie supérieure de cette tige verticale.

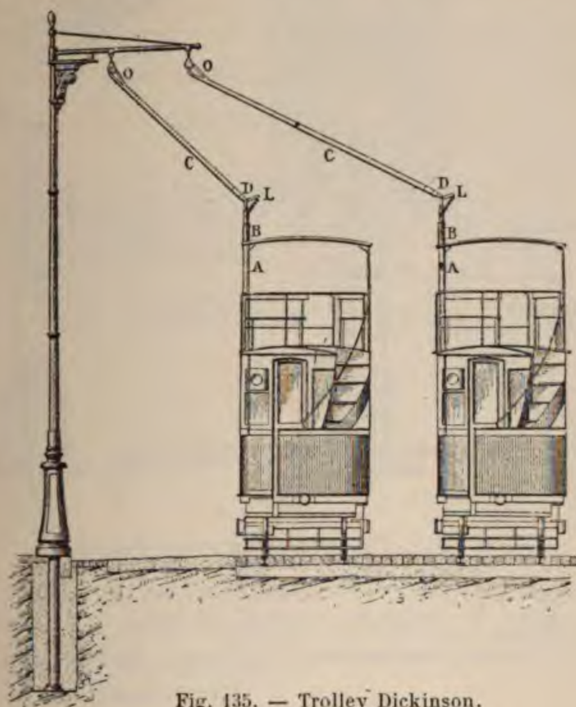


Fig. 135. — Trolley Dickinson.

peut donc prendre dans le plan horizontal toutes les inclinaisons possibles par rapport à l'axe de la voie. Quant à la roulette de prise de courant (fig. 137), elle peut également prendre un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire à son axe de rotation ; de sorte que finalement la voiture peut prendre par rapport au fil aérien les différentes positions indiquées sur la figure 138. La limite extrême est fixée par la projection horizontale de la tige inclinée du trolley.

Nous ajouterons enfin que la roulette peut également prendre différentes inclinaisons dans le plan vertical ; ces inclinaisons sont contrôlées par les ressorts inclinés indiqués sur la figure 136.

2° Trolleys à frottement. — Nous ne parlerons pas du trolley à frotteur où la roulette ordinaire est remplacée par une sorte de

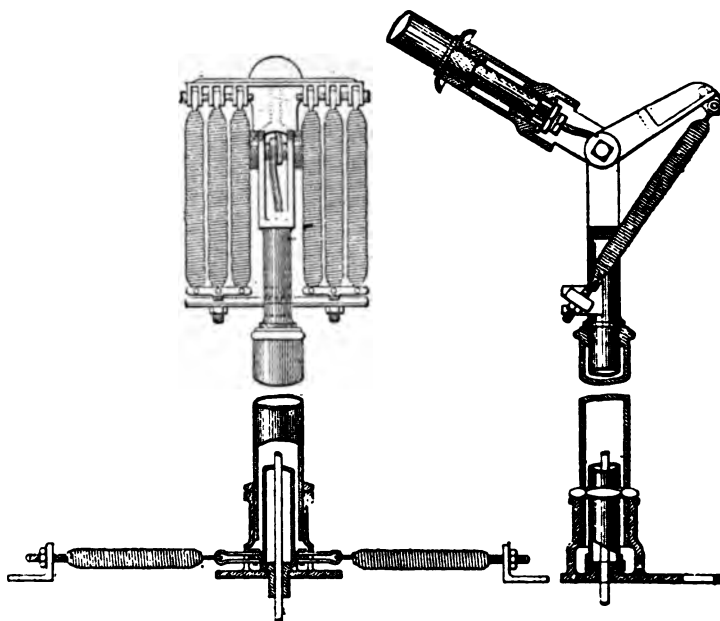
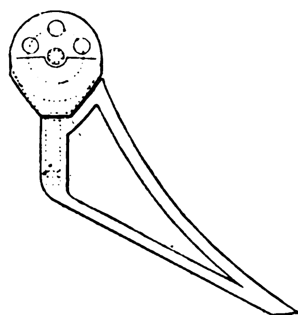


Fig. 136. — Tige verticale du trolley Dickinson.

spatule munie de graphite servant de prise de courant ; cette disposition paraît abandonnée. Nous nous étendrons un peu plus longuement sur le système à *archet*, employé il y a déjà quelque temps par Sprague aux États-Unis, puis abandonné par lui et repris dans ces derniers temps par la Société Siemens et Halske. Il a reçu quelques applications en France. L'archet a la forme représentée par la figure 139. La partie du fil *a b* qui est celle qui limite l'étendue de prise du courant, est enveloppée d'une gaine en aluminium *m n* dont la section est représentée sur la figure ;



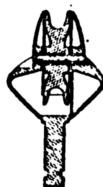


Fig. 137. — Roulette du trolley Dickinson.

cette gaine, en deux morceaux démontables et réunis par des vis, est munie à sa partie supérieure de deux rainures dans lesquelles

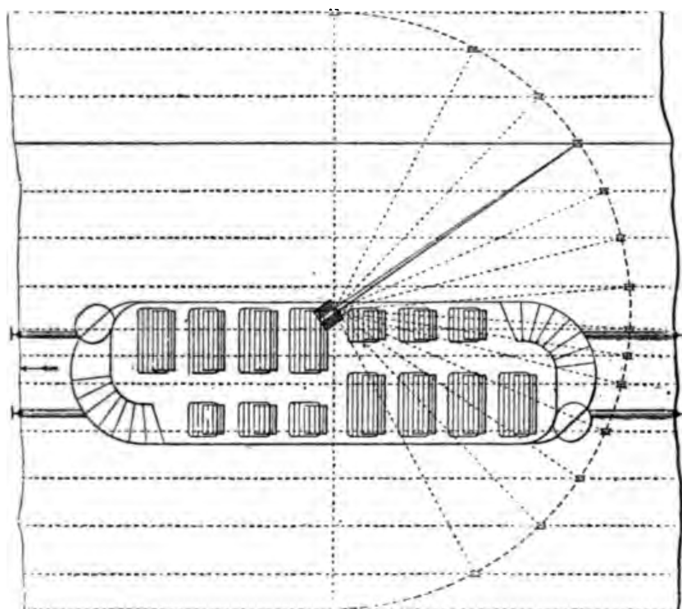


Fig. 138.

on introduit de la graisse pour lubrifier le fil aérien et en diminuer l'usure. La gaine en aluminium s'use du reste plus rapidement que le fil et se remplace très facilement.

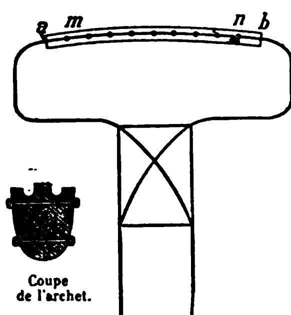


Fig. 139. — Archet.

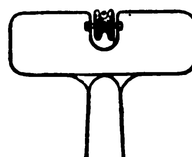


Fig. 140. — Archet avec roulette.

On a employé également la disposition représentée par la figure 140 ; le contact, dans les alignements droits, se fait sur

la roulette et l'usure est ainsi réduite à son minimum ; dans les courbes il se fait sur les parties latérales de l'archet. La disposition de l'ensemble est représentée sur la figure 141.

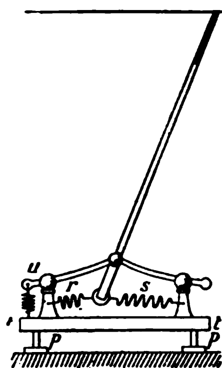


Fig. 141. — Archet avec roulette.

On peut également citer la disposition d'archet de la Compagnie Walker, où la partie *a b* du fil de l'archet précédent est remplacée par un petit rouleau monté sur billes et formant prise de courant.

Inutile d'ajouter que l'archet, comme le trolley ordinaire, est muni de ressorts horizontaux qui permettent sa variation d'inclinaison dans le sens longitudinal de la voiture.

La largeur *a b* de l'archet réservée pour la prise du courant est généralement de 1,50 m., soit 0,75 m. de chaque côté de l'axe.

Dans les courbes le fil aérien peut donc former des côtés de polygones beaucoup plus longs, ce qui diminue le nombre des poteaux de support et des haubans de suspension ; le coincement de la roulette, qui est à redouter dans les courbes de petit rayon avec le système ordinaire, disparaît complètement avec cette disposition.

Moteurs des voitures. — Les moteurs qui servent à la propulsion des voitures ont les mêmes dispositions, et leur fonctionnement est semblable à celui des moteurs dont nous avons parlé à propos de la traction électrique par accumulateurs ; nous n'y reviendrons donc pas.

Retour du courant. — Le retour du courant aux dynamos génératrices de l'usine centrale peut se faire au moyen d'un second fil aérien avec trolley, posé parallèlement au premier et relié, avec ou sans feeders, aux pôles de la dynamo. Ce système, employé au début de la traction électrique, est coûteux et aujourd'hui complètement abandonné. On préfère se servir des rails de la voie comme conducteurs du courant de retour.

Ce dernier système, évidemment plus économique, exige

certaines précautions indispensables. Il y a en effet deux choses importantes à considérer : d'abord la section à donner pour l'écoulement de ce courant de retour, et ensuite, la *continuité électrique*, aussi parfaite que possible, du conducteur de retour.

La section à donner aux rails dépend du voltage à maintenir entre les deux extrémités de la conduite de retour. Cette différence de potentiel ne doit pas dépasser 5 volts (7 volts en Angleterre), dans le but d'éviter les effets d'*électrolyse* dont nous aurons à parler tout à l'heure.

Elle dépend également de la résistance spécifique du rail. Lorsque ceux-ci étaient en fer, on admettait généralement que cette résistance spécifique était huit fois plus grande que celle du cuivre, et, étant donné le poids des rails employés, on admettait également que leur section suffisait largement à l'écoulement du courant de retour, et on s'en tenait là. Actuellement les rails sont en acier d'une certaine dureté, afin d'en diminuer l'usure et d'en prolonger, par suite, la durée. Mais ce métal dur ne peut s'obtenir qu'en combinant avec le fer d'autres métaux, tels que le manganèse, qui augmentent dans une forte proportion la résistance spécifique, ainsi que l'ont démontré des expériences récentes.

La résistance spécifique des rails ne peut donc pas être considérée comme constante ; elle a pour base la composition chimique de ceux-ci. C'est donc à l'expérience seule qu'on peut s'en rapporter dans chaque cas particulier, en mesurant directement cette résistance sur des échantillons prélevés sur des rails.

Il y a lieu aussi de tenir compte des joints des rails qui, malgré les précautions prises pour en maintenir la *continuité électrique*, et dont nous parlerons plus loin, augmentent la résistance à l'écoulement du courant d'une manière importante.

La détermination de la section à donner aux rails, relativement à la section des fils conducteurs aériens et des feeders, qui eux ont été calculés pour un trafic déterminé, a été étudiée tout dernièrement par M. Blondel dans un mémoire publié dans le numéro du 18 juillet 1896 de l'*Éclairage Électrique*. Il serait trop long même de résumer les différentes considérations qui sont développées dans ce mémoire; mais nous donnerons la

formule à laquelle l'auteur est arrivé, formule qui résume son travail.

Etant donnés : d, la distance du point d'attache d'un feeder d'alimentation de la ligne aérienne à la station centrale ;

p, le poids du rail par mètre courant ;

r, la résistance du fil aérien ;

r', la résistance du rail ;

d', la distance du point d'attache du feeder de retour par les rails à la station centrale ;

K, le coefficient de résistance dû aux joints ;

M, le rapport entre la perte de charge admise dans le conducteur aérien et le feeder, et celle admise dans les rails et le feeder de retour.

La section s du feeder d'alimentation, correspondant à un rail de retour pesant un poids p par mètre courant, ou réciproquement le poids p à donner aux rails de retour de la voie pour un feeder d'alimentation dont la surface est s, sera :

$$s = \frac{pd^2r}{0,0039\, d'^2r'KM}; \quad p = \frac{0,0039\, d'^2r'KM\, s}{d^2r}$$

Nous pourrons simplifier ces formules en faisant certaines hypothèses qui résultent de la pratique. Ainsi nous pouvons admettre, comme première hypothèse, que le rapport $\frac{r'}{r} = 8$; que le coefficient de résistance dû aux joints est de $1,50 = K$; que le $d = d'$; enfin que $M = 10$. Ce dernier chiffre trouve sa justification dans le fait que, ordinairement, on admet dans le fil aérien une perte de charge de $\frac{1}{10}$, ce qui, pour un voltage de 500 volts qui est celui habituellement employé, donne une perte de charge de 50 volts. La différence de potentiel dans le fil de retour ne devant pas dépasser 5 volts, ainsi que nous l'avons dit, et comme nous l'expliquerons plus loin en parlant de l'électrolyse, le rapport $M = \frac{50}{5} = 10$. Les formules précédentes deviennent alors :

$$s = 2,14\, p ; \quad p = \frac{s}{2,14}.$$

Elles permettent de déterminer le poids, par mètre courant, du rail qui devra servir au courant de retour fourni par le feeder et le conducteur aérien dont la surface est s, ou réciproquement.

La *continuité électrique* du rail doit être aussi parfaite que possible, car toute perte de courant peut être la cause d'actions électrolytiques très graves. Or, c'est aux joints des rails que se produit la plus grande résistance et c'est en ces points que les pertes sont le plus à craindre.

Les éclisses ordinaires ne suffisent pas pour maintenir une continuité électrique suffisante ; par suite de l'oxydation, les contacts entre les éclisses et les rails deviennent imparfaits, et, en y ajoutant le desserrage des boulons, il se produit rapidement des pertes de courant considérables.

On supplée à cette imperfection en reliant les rails à l'aide de *fils de cuivre* dont la section est calculée de manière à maintenir la perte totale de charge admise ; on se base pour cela sur le rapport entre la résistance électrique du rail et celle du cuivre, qui est généralement de 8, mais qui cependant peut différer de ce chiffre, comme nous l'avons dit, suivant sa composition, et qu'il est bon de déterminer expérimentalement.

Des dispositions doivent être prises également pour assurer d'une manière parfaite le contact entre le rail et les fils de cuivre aux points de jonction, cette surface de contact devant être huit fois plus grande que la section du fil.

Nous indiquons ci-après différentes dispositions admises dans la pratique.

La figure 142 représente le fil de cuivre serré à sa jonction avec le rail au moyen de manchons coniques en cuivre.

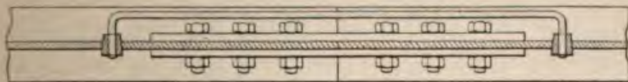


Fig. 142. — Eclissage avec manchons en cuivre.

La Société Alsacienne emploie des bouchons en acier, enfoncés à frottement dans les rails et au travers desquels pénètrent à leur extrémité les fils de cuivre (fig. 143).

Nous citerons également le joint employé en Amérique, connu sous le nom de *Rail bond Chicago*, qui donne d'excellents résultats. Les extrémités du fil de cuivre (fig. 144) sont terminées par une sorte de tête creuse à l'intérieur de laquelle on fait

pénétrer de force un rivet de forme conique qui assure le contact du fil entre le rail et la tête creuse ; on rabat ensuite les rebords de l'ouverture de la tête contre l'âme du rail.

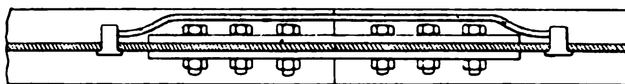


Fig. 143. — Eclissage avec bouchons en acier de la Société Alsacienne.

Le joint à boucle, employé sur les tramways de Boston (États-Unis), est représenté par la figure 145. Un manchon en acier assure le contact avec le rail.

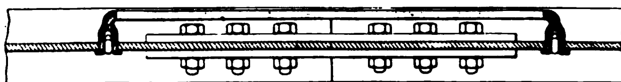


Fig. 144. — Rail bond Chicago.

On augmente le nombre des fils de connexion suivant l'intensité du courant.

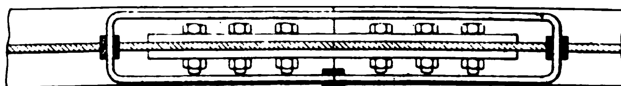


Fig. 145. — Eclissage à boucle.

On emploie depuis quelque temps aux Etats-Unis le *Plastic Rail bond;* dans ce système de joint, ce sont les éclisses qui assurent elles-mêmes la continuité électrique du rail, et leur contact avec celui-ci est obtenu au moyen d'un disque en métal plastique interposé entre les deux surfaces. L'allongement ou la contraction des rails, sous l'influence de la température, ne modifie en rien le contact électrique, qu'on a soin du reste de rendre aussi complet que possible en décapant au préalable les surfaces de contact.

La meilleure solution pour obtenir une continuité électrique parfaite pour le retour du courant par les rails est évidemment la réunion de tous ces rails en une seule barre, en les soudant les uns

avec les autres bout à bout. Mais il y a alors à tenir compte des efforts qui se produisent dans ces longues barres, sous l'influence des variations de température. Il pourra y avoir déformation de la voie, et ces déformations pourraient amener des déraillements. Les efforts produits pourraient même être suffisants pour amener la rupture des rails. Ce sont des phénomènes souvent observés sur les voies de chemin de fer, lorsque les joints sont trop serrés.

La soudure des rails a été employée aux États-Unis dans ces dernières années ; elle a été appliquée à Portland et à Saint-Louis sur un parcours de plus de 5 kilomètres. Malgré les brusques variations de température, la dilatation n'a pas, paraît-il, causé de dégâts. Quelques soudures ont cédé, mais, une fois refaites, elles se sont aussi bien comportées que les autres ; on a observé de plus que, lorsqu'il y a des ruptures, ce n'est pas aux joints qu'elles se produisent.

Cette expérience ne donne pas un résultat complètement satisfaisant ; elle montre cependant que cette voie s'est mieux comportée qu'une voie de chemin de fer ordinaire dans les mêmes conditions. Ceci ne peut évidemment être attribué qu'à la différence de situation de ces deux voies.

Les voies de tramways sont noyées dans la chaussée, et, d'après les observations de M. Pélissier reproduites dans la *Nature*[1], même sous des variations de température de 40 à 45°, la limite d'élasticité du métal n'est pas atteinte[2] ; les rails tendent, dans ce cas, à prendre la température moyenne du sol. De plus, la voie est maintenue par les traverses et par la chaussée, ce qui empêche la propagation de la déformation des rails, ou du moins l'atténue.

Quoi qu'il en soit, des essais plus nombreux, et surtout d'une plus longue durée, nous paraissent nécessaires avant de prendre parti pour ce procédé et de l'appliquer sur une grande échelle ; il n'a,

[1] Voir *La Nature*, numéro du 8 février 1896.

[2] Le coefficient de dilatation de l'acier étant de 0,000 012 et le module d'élasticité de 20 000 par mm², l'effort produit dans le rail sera de :

$$0{,}000\,012 \times 40 \times 20\,000 = 9{,}6 \text{ kg.}$$

par mm², inférieur au coefficient d'élasticité de l'acier.

du reste, d'intérêt réel que pour les lignes à trafic considérable, ayant un courant de retour très intense.

Comme on le sait, cette soudure se fait électriquement, par le procédé Johnson ou par le procédé de la Falk Manufacturing C°; ce dernier consistant à réunir les bouts par un manchon en fer coulé dans un moule fixé aux rails [1]. La soudure électrique des joints est très coûteuse et revient à 15 ou 20 francs.

Lorsque le courant de retour est important, on réunit les éclissages des rails à un ou plusieurs fils de cuivre formant feeders de retour et placés parallèlement à la voie, suivant les dispositions

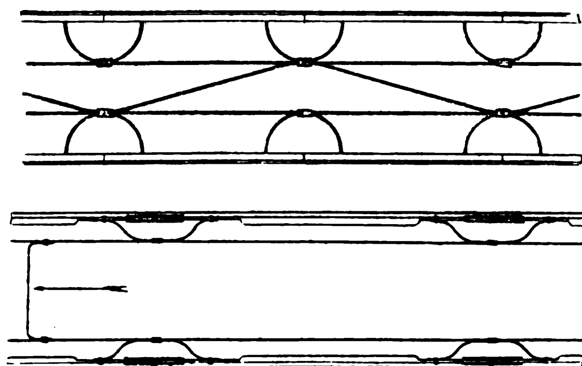


Fig. 146. — Feeders du courant de retour.

indiquées figure 146. Ces feeders de retour se calculent suivant les formules que nous avons indiquées précédemment.

On voit donc que la résistance du joint du rail est importante, et des expériences constatant, au moyen de chiffres exacts, cette résistance seraient des plus intéressantes ; malheureusement ces expériences sont rares. Nous citerons celles faites par M. R. Dunning et reproduites dans l'*Electric Railway Gazette* de février 1896.

Dunning a constaté l'énergie perdue à chaque joint, en mesurant l'intensité du courant et la chute de potentiel à ce point.

Le tableau ci-contre donne les résultats obtenus :

[1] *Eclairage Électrique*, numéro du 10 juillet 1897.

EXPÉRIENCES DE M. R. DUNNING

NUMÉRO de l'expérience.	INTENSITÉ du courant en ampères : I.	CHUTE de potentiel dans le joint considéré en volts : E.	ÉNERGIE dissipée dans le joint en watts : W = EI.	OBSERVATIONS
N° 1 Joint ordinaire, 1 fil de cuivre. Poids du rail = 45 kg.	125 1 200 1 400	0,0375 0,208 0,313	4,7 249,6 453,8	On a constaté que le joint était très chaud à la fin des essais.
N° 2 Joint ordinaire, 2 fils de cuivre. Poids du rail = 45 kg.	200 1 200 1 500	0,028 0,178 0,210	5,6 213,6 315,0	Joint très chaud.
N° 3 Joint dit plastique.	190 200 1 200 1 400	0,002 0,01 0,035 0,04	0,32 2,00 42,00 56,00	Joint resté froid.
N° 4 Poids du rail = 45 kg.	190 400 1 200 1 500	0,0043 0,0201 0,0638 0,086	0,83 8,04 75,36 129,00	Joint resté froid.
N° 5 Poids du rail = 32 kg.	190 1 200 1 500	0,0018 0,0428 0,0422	0,36 51,36 54,86	Joint resté froid.
N° 6 Poids du rail = 31 kg.	200 1 000 1 300 1 500	0,0026 0,038 0,055 0,066	0,52 38,00 72,02 100,52	Joint resté froid.

Actions électrolytiques. — En parlant du courant de retour, nous avons dit qu'il était de règle actuellement de se servir des rails de la voie comme conduite de retour pour ce courant. Cette disposition est économique, puisqu'elle supprime un second fil de trolley avec ses feeders et ses accessoires; mais elle exige une conductibilité électrique de la voie suffisante pour éviter

toute dérivation du courant de retour; car, sans cela, cette dérivation reviendrait à la dynamo de l'usine centrale, en profitant de toutes les masses de métal (conduites d'eau, de gaz, câbles, etc.) qu'elle pourrait rencontrer sur son passage et qu'elle suivrait tout naturellement, étant donné leur peu de résistance électrique.

Il en résulterait une oxydation de ces masses métalliques et, au bout de très peu de temps, une détérioration complète exigeant leur remplacement.

Ce sont ces effets d'oxydation résultant des dérivations du courant de retour, qui portent le nom d'*effets électrolytiques*, dont nous allons nous occuper succinctement.

Soit (fig. 147) une dynamo génératrice A envoyant le courant dans le fil aérien CD ; une voiture M que nous supposerons

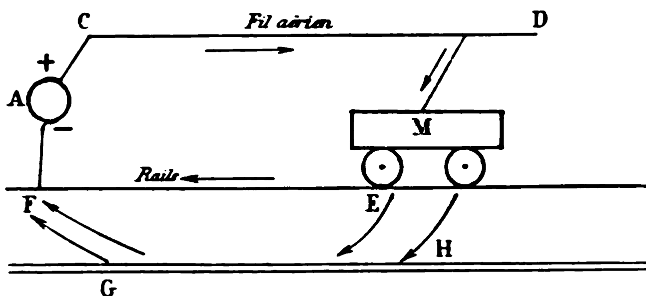


Fig. 147.

placée à l'extrémité de la ligne, roulant sur les rails E F, par lesquels se fait le retour du courant à la dynamo A.

Supposons une masse métallique GH placée en terre et parallèlement aux rails de la voie. Il existe une certaine différence de potentiel, dans les rails, entre les points E et F, et si la résistance offerte par la terre et la masse métallique H G est inférieure à cette différence de potentiel, il en résultera une dérivation de courant, indiquée par les flèches, et qui suivra la masse métallique.

En traversant l'électrolyte, qui est ici la terre plus ou moins mouillée, le courant dérivé E H décomposera l'eau, et l'oxydation se portera, comme toujours, à l'anode, à l'endroit où le courant quitte le conducteur, c'est-à-dire ici en E; les rails

seront donc oxydés tandis que la masse métallique en H ne sera aucunement attaquée.

Le courant dérivé suivra la masse métallique H G et rejoindra la dynamo A en suivant la direction GF indiquée par les flèches ; mais ici l'anode, c'est-à-dire le point de sortie du courant et où se porte l'oxydation, est en G sur la masse métallique, et ce sera par conséquent cette masse (tuyaux, câbles, etc.) qui sera détériorée par l'oxydation. Les effets électrolytiques se porteront donc sur la masse métallique en G, c'est-à-dire à son extrémité près de la dynamo génératrice. Cette détérioration sera d'autant plus grande que l'intensité du courant sera elle-même plus grande, ainsi que la surface de la masse métallique ; elle dépendra aussi du degré d'humidité du sol et des sels qui y seront contenus.

Si la masse métallique est formée de tuyaux, ceux-ci ne devront présenter aucune solution de continuité comme *a c*, *d b* (fig. 148), car sans cela il se formerait à ce joint une nouvelle dérivation de courant indiquée par les flèches *f*, *f*, et l'extrémité *a b* du tuyau qui forme anode s'oxyderait avec une très grande rapidité.

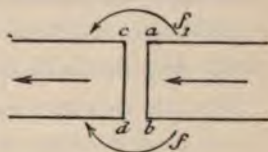


Fig. 148.

Nous venons d'indiquer les causes déterminantes des actions électrolytiques ; voyons maintenant quels sont les moyens dont on peut disposer pour en diminuer l'importance.

Puisque ces actions électrolytiques sont le résultat d'une dérivation du courant de retour, un des moyens les plus sûrs pour en éviter les effets désastreux sera d'empêcher cette dérivation du courant.

Plusieurs moyens peuvent être employés.

On peut s'arranger de manière que la différence de potentiel entre les deux extrémités des rails formant conducteur de retour, soit inférieure à la force électromotrice nécessaire pour faire passer le courant dérivé suivant E H G F. Or cette force électromotrice se compose de la force contre-électromotrice de polarisation du sol en E H et en G F ; comme cette force peut être admise de 2 volts, on aura donc de ce chef $2 \times 2 = 4$ volts ; elle se compose, en outre,

de la résistance du fer qu'on peut estimer égale à 1 volt. La force électromotrice totale sera donc de 5 volts et la chute de potentiel, entre les deux extrémités des rails, de retour du courant, ne devra pas dépasser ce chiffre, qui est du reste celui admis en France. En Angleterre, le « Board of Trade » admet une différence de potentiel de 7 volts.

On obtiendra cette chute de potentiel de 5 volts en diminuant le plus possible la résistance du conducteur de retour, soit en augmentant sa section, et par suite le poids des rails, et en faisant un bon éclissage électrique, soit, quand ces moyens sont insuffisants, en employant des feeders de retour qui relient la dynamo génératrice avec certains points de la voie, quoique cette disposition soit coûteuse. Toutefois ces feeders de retour ne deviennent indispensables que lorsque la longueur de la ligne dépasse 5 km.

Au lieu de diminuer la résistance du conducteur de retour, on peut agir sur l'intensité du courant qui doit circuler dans ce conducteur, et obtenir également, par ce moyen, la réduction de la chute de potentiel à 5 volts.

Les Américains ont, dans cet ordre d'idées, appliqué sur quelques lignes de tramways à deux voies le système de distribution à trois fils, les rails formant le troisième conducteur. Ce système a donné, paraît-il, de bons résultats, mais il entraîne certaines complications qui en rendent l'application souvent difficile.

Avec cette disposition, sur une ligne à deux voies, lorsque le nombre des voitures montantes est le même que celui des voitures descendantes, le courant de retour dans les rails est nul et aucun effet électrolytique n'est à craindre.

En dehors de ce moyen, qui a pour base la réduction du potentiel entre les deux extrémités de la ligne, nous pouvons citer un autre procédé qui a été assez souvent employé, notamment sur le vaste réseau de tramways électriques de Boston. Il consiste à capter les courants dérivés qui circulent dans les conduites ou les masses métalliques aux endroits dangereux, c'est-à-dire aux points où ceux-ci, quittant la masse métallique, reviennent à la dynamo génératrice.

Or, en nous reportant à la figure 147, nous voyons que ces points dangereux sont en G, près de l'usine centrale. Si donc, en

ce point, nous relions la masse métallique G H avec la dynamo, au moyen de conducteurs peu résistants, il est clair que le courant reviendra directement à la dynamo, sans passer à travers la terre, et tout effet électrolytique aura disparu.

Mais il faut avoir bien soin de ne mettre ces liaisons électriques entre la masse métallique et les rails qu'aux points dangereux, car autrement ces conducteurs amèneraient le courant des rails dans la masse métallique et donneraient un résultat complètement opposé à celui qu'on veut obtenir. On peut du reste trouver facilement ces points dangereux, au moyen d'un voltmètre. Ce système diminue naturellement la résistance du conduit dérivé, et par suite l'intensité de ce courant augmente. Si donc la masse métallique offre des solutions de continuité, il est à craindre que de graves corrosions ne viennent à se produire en ces points, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment.

Nous devons encore citer un autre procédé qui consiste à changer le sens du courant, en rendant alternativement les rails et la masse métallique positifs et négatifs, par rapport à la terre. En effectuant ces inversions à des intervalles de temps très rapprochés, comme dans le cas des courants alternatifs polyphasés (tramways de Lugano), les effets électrolytiques disparaissent entièrement. On se trouve dans les mêmes conditions, comme résultat, que lorsqu'on emploie deux conducteurs aériens, l'un formant courant d'aller et l'autre courant de retour.

On voit donc que l'on peut disposer d'un assez grand nombre de procédés permettant de lutter efficacement contre les corrosions résultant des effets électrolytiques, quoique ces procédés soient quelquefois coûteux, surtout lorsque la longueur de la ligne dépasse 5 km. avec un trafic intense.

Ce n'est du reste qu'au début de la traction électrique, et surtout en Amérique, que ces corrosions ont pris une importance véritablement inquiétante. A cette époque on ne prenait que peu de soin pour la conduite de retour; les rails étaient trop faibles comme section et les connexions aux joints mauvaises. On cite des installations aux États-Unis où les courants dérivés par les tuyaux atteignaient 40 p. 100 du courant de retour; les joints des rails étaient si mauvais qu'il s'y produisait des différences de potentiel suffi

santes pour donner des chocs violents aux hommes et aux ani maux.

Depuis que de plus grandes précautions ont été prises pour l'établissement et les connexions des rails de retour, ces inconvénients ont, sinon disparu, tout au moins considérablement diminué.

En Europe, où les installations des tramways électriques ont toujours été plus soignées, les effets électrolytiques n'ont jamais eu qu'une faible importance et sont actuellement assez rares, grâce surtout à l'application des procédés que nous avons indiqués.

Il nous resterait encore à parler d'une autre source de perturbations : ce sont celles produites sur les lignes téléphoniques et sur les appareils électriques de mesure ; mais, outre que les causes de ces perturbations sont encore loin d'être bien définies, les moyens à employer pour les faire disparaître ne sont pas non plus bien déterminés. On trouvera du reste des renseignements très intéressants sur ce sujet dans le mémoire de M. Van Vloten, publié par l'*Electricien*.

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES DE ROUEN

Comme exemple de tramways à trolley, nous donnerons la description des tramways de Rouen, construits par la Compagnie Thomson-Houston et mis en exploitation au mois de janvier 1896.

Le réseau a une étendue de 37 km. ; les rampes maxima varient entre 45 et 50 mm. par mètre et le rayon minimum des courbes est de 20 m.

La voie, à l'écartement normal de 1,44 m., est en rails Broca pesant 44 kg. par mètre.

Usine centrale. — L'usine centrale est située à Saint-Sever, près de la rue Lemire. Dans cette usine sont installées :

Deux dynamos à 4 pôles du type Thomson-Houston, de 300 kw. chacune, et une troisième dynamo, également à 4 pôles, du même type, mais de 200 kw. seulement ; elles sont hypercompoun-

dées et doivent produire 550 volts à pleine charge et 500 volts à vide. Leur vitesse est de 400 tours par minute.

Chacune de ces dynamos est actionnée, au moyen de courroies, par une machine à vapeur Farcot à distribution genre Corliss; la puissance indiquée de chacune de ces machines varie entre 300 et 400 chevaux, à la vitesse de 80 tours par minute et avec une pression de vapeur à l'admission de 6 à 7 kg. Le diamètre des cylindres est de 0,57 m. et la course du piston de 1,20 m.

La régularité de la marche est obtenue au moyen d'un volant de 5,70 m. de diamètre pesant 20 tonnes. Ces machines sont à condensation.

Par suite du développement du service, on a dû ajouter dernièrement une quatrième dynamo à 8 pôles, également du type Thomson-Houston, marchant à la vitesse de 100 tours et d'une puissance de 500 kw. Cette dynamo est actionnée directement par une machine à vapeur compound tandem, du système Mac-Intosh et Leyman, d'une puissance de 1 000 chev. indiqués. Cette machine est à condensation comme les précédentes.

Cinq chaudières Babcock et Wilcox, de 170 m² de surface de chauffe chacune, servent à l'alimentation de vapeur de ces différentes machines; elles sont munies d'un économiseur Green destiné au réchauffage de l'eau d'alimentation.

Conducteurs de courant. — Le fil aérien qui sert à l'alimentation des voitures est en cuivre et d'un diamètre de 8,25 mm.; ces fils aériens, placés dans l'axe de la voie, sont supportés par des câbles transversaux en acier fixés, à chacune de leurs extrémités, à des poteaux tubulaires également en acier de 7 m. de hauteur, formés de 4 sections avec joints recouverts par des bagues en fonte. Les fils transversaux sont isolés à la fois de la ligne aérienne et des poteaux métalliques, afin d'éviter toute dérivation de courant. Sur les quais et dans les voies larges les poteaux de support sont à double console et placés dans l'entre-voie.

Sur un certain nombre de ces poteaux sont installées des lampes à arc ou à incandescence, destinées à l'éclairage; l'électricité nécessaire pour cet éclairage est fournie par une Compagnie indépendante de la Compagnie des Tramways.

Le réseau complet est divisé en quatre sections, alimentées chacune par un feeder reliant l'usine centrale avec chacune de ces sections; un feeder spécial sert au retour du courant.

Les feeders d'alimentation ont une section de 200 mm² et une longueur totale de 6 km.; ils sont isolés au caoutchouc et placés en terre.

Les feeders de retour, fixés aux rails et de 150 mm² de section, sont formés par des câbles en cuivre nu, noyés dans un caniveau en bois rempli de bitume.

Dans chaque section, le retour du courant se fait par l'intermédiaire des rails de la voie; dans ce but, ceux-ci sont reliés au moyen d'éclisses et d'un double fil de cuivre de 8 mm. de diamètre, fixé au rail à l'aide du « Chicago Rail bond » que nous avons décrit ailleurs. Dans le but de faciliter encore le retour du courant, les rails d'une même voie sont réunis entre eux, ainsi que ceux des voies parallèles.

Dans la crainte que ces précautions soient insuffisantes, et que des effets électrolytiques ne viennent encore à se produire, par suite d'une trop grande différence de potentiel dans le courant de retour, on a ajouté deux feeders de retour isolés, de 300 mm² de section et de 1 100 m. de longueur, reliant deux points du réseau avec l'usine centrale. Ces feeders sont reliés à l'usine à deux survolteurs actionnés par un moteur électrique de 25 chev.; ces survolteurs doivent compenser la perte de charge due à ces feeders et maintenir à leur extrémité un potentiel constant; ils sont pour cela enroulés en série.

Voitures. — Les voitures sont à double plate-forme et marchepied latéral; l'intérieur est divisé en deux classes par une porte à coulisse. Elles contiennent 24 places d'intérieur et 16 debout, soit en tout 40 places; leur longueur totale est de 8 m. et le poids à vide de 7 tonnes; le poids en charge est de 10 tonnes environ.

La caisse de la voiture repose, au moyen d'une double suspension élastique, sur des trucks à la fois robustes et légers (fig. 149 et 150).

Chaque essieu de la voiture est actionné par un moteur du sys-

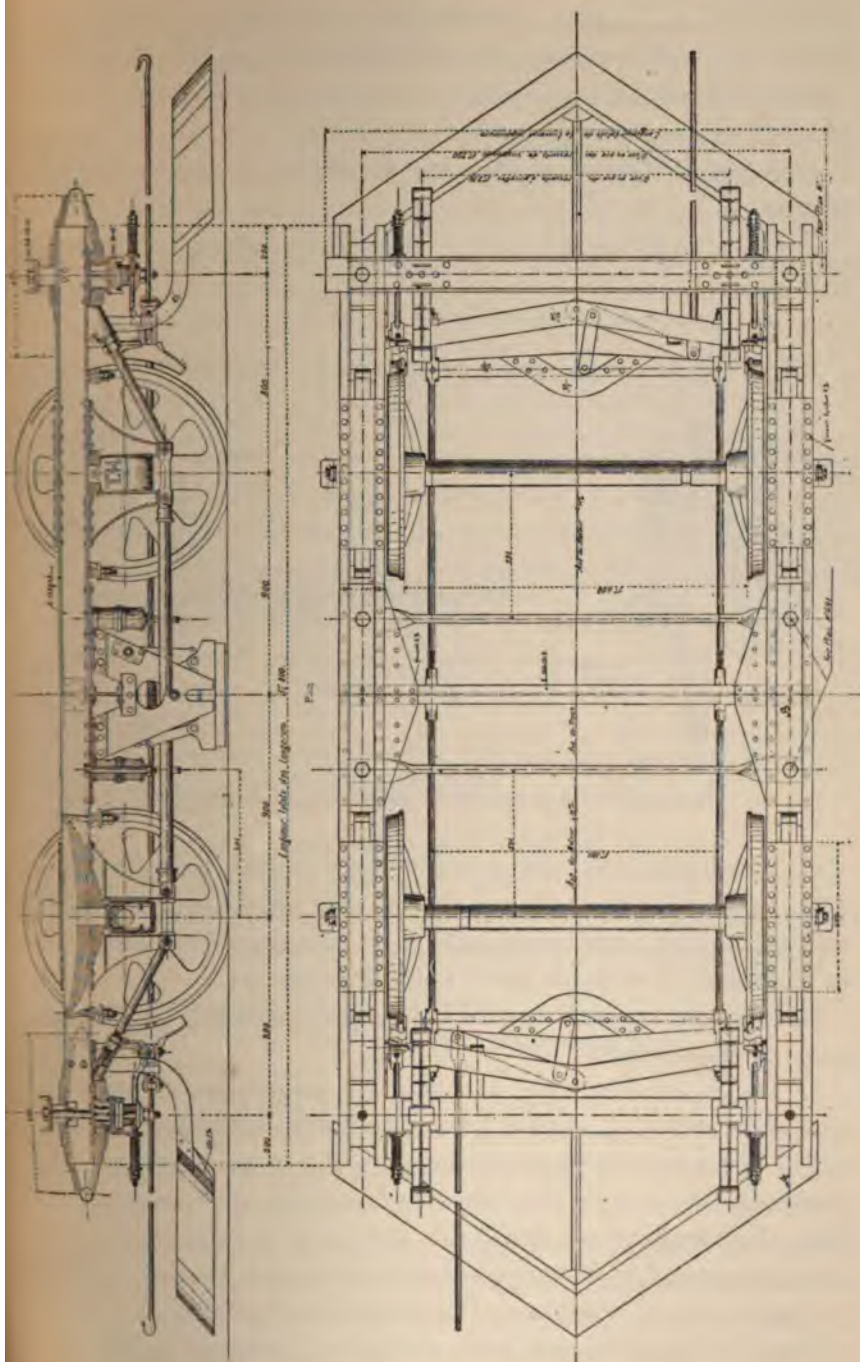


Fig. 149. — Truck des voitures des tramways électriques de Rouen.

tème Thomson-Houston, type GE. 800, que nous avons décrit plus haut et qui, enfermé dans une boîte en acier afin de le mettre complètement à l'abri de la poussière, actionne l'essieu au moyen d'une paire d'engrenages baignant dans l'huile.

Le poids de chaque moteur est de 660 kg. et sa puissance de 25 chev.

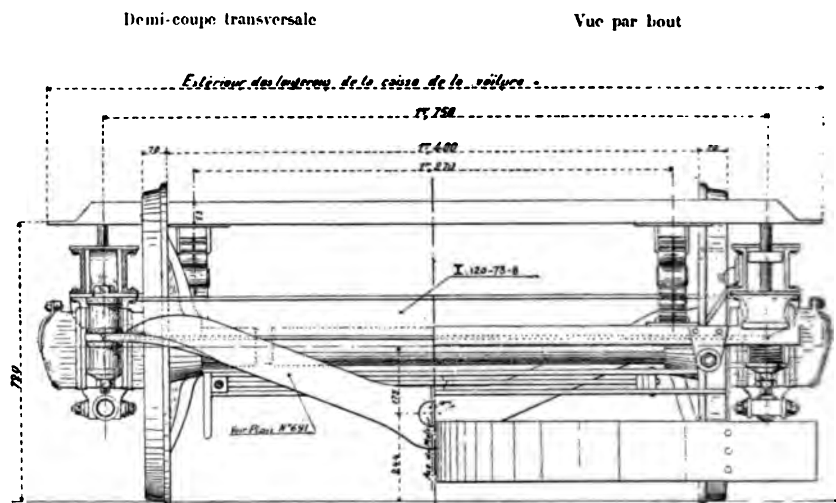


Fig. 150.
Truck des voitures des tramways électriques de Rouen.

On peut facilement accéder aux moteurs par des trappes ménagées dans le plancher de la voiture, et, pour les visiter, il suffit de faire basculer la partie supérieure de la boîte du moteur autour de sa charnière, en mettant ainsi l'induit à découvert.

Les moteurs reposent sur les trucks par l'intermédiaire de tampons en caoutchouc.

Le trolley est formé par une poulie à gorge profonde dont les coussinets sont en graphite. La tige du trolley est disposée sur le toit de la voiture, de manière à lui permettre de prendre toutes les positions et de se tenir verticalement lorsqu'elle est complètement libre. Le coupleur est semblable à ceux dont nous avons parlé précédemment. Les démarrages étant obtenus par la mise en série des moteurs avec résistance, l'augmentation de vitesse a lieu en réduisant successivement cette résistance, puis en mettant les

dynamos en parallèle avec résistance successivement décroissante. Le coupleur permet aussi le changement de marche.

L'éclairage des voitures se fait à l'aide de cinq lampes à incandescence alimentées par une dérivation du courant principal.

D'après les relevés faits pendant plusieurs mois, la dépense en kilowatts-heure par kilomètre-voiture est de 710 et la consommation de charbon par kilomètre-voiture de 1,36 kg.

DÉPENSES DE TRACTION PAR KILOMÈTRE-VOITURE

Le poids d'une voiture contenant 50 voyageurs est d'environ 10 tonnes. Avec la résistance moyenne de 17,5 kg. par tonne que nous avons prise comme base de nos calculs, le travail en chevaux indiqués que devra produire la machine à vapeur motrice des dynamos génératrices, sera de :

$$\frac{17,5 \times 10 \times 1\,000}{270\,000 \times 0,44} = 1,48 \text{ chev.}$$

avec un rendement total de 44 p. 100, suivant les indications que nous avons données précédemment ; soit en watts :

$$1,48 \times 75 \times 9,80 = 1,09 \text{ kw.}$$

En admettant pour le prix du kilowatt, 0,15 fr., la dépense de traction, par kilomètre-voiture, pourra s'établir comme il suit :

Force motrice, 1,09 kw. à 0,15 fr.	0,164 fr.
Entretien et réparation des voitures, moteurs et graissage.	0,060 —
Entretien du fil aérien	0,010 —
Salaire du wattman.	0,080 —
Dépense de traction par kil.-voiture	0,314 fr.

A ce chiffre de dépenses de traction proprement dites, il faut ajouter celles qui sont dues à l'amortissement des installations spéciales au service de la traction, qui, pour une ligne du genre de celle que nous considérons, c'est-à-dire d'une longueur de 30 km., ayant

30 voitures dont 20 en service, parcourant chacune 150 km. jour, peut s'établir comme il suit :

Générateurs, moteurs, tuyauterie, pompes, cheminée	150 000 fr.
Dynamos, transmission des dynamos et tableau de distribution	130 000 —
Bâtiments des dépôts, ateliers et outillage. . . .	150 000 —
30 voitures à 16 000 fr.	480 000 —
Conducteur aérien à 25 000 fr. le km. (25 000 × 30) .	750 000 —
Total	1 660 000 fr.

Ce qui représente, pour un parcours annuel de 1 000 000 de k une dépense de :

$$\frac{1\,660\,000 \times 0,1}{1\,000\,000} = 0,17.$$

La dépense de traction totale par kilomètre-voiture s'élèvera d à : 0,314 fr. + 0,170 fr. = 0,484 fr.

TRACTION ÉLECTRIQUE

PAR CANIVEAUX ET CONDUCTEURS SOUTERRAINS

Si la pose des conducteurs aériens avec trolleys ne présente pas de difficulté sérieuse lorsque les voies de tramways ont à suivre les grandes artères extérieures convergeant vers des centres populeux, ou des voies larges et bien alignées servant de pénétration dans l'intérieur des villes, toute question d'esthétique mise à part, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit, comme dans beaucoup de villes européennes, de rues intérieures étroites et tortueuses et à circulation très intense.

La pose des fils aériens exige alors des changements de direction fréquents, l'emploi de nombreux haubans transversaux plus ou moins compliqués, ainsi qu'un grand nombre de colonnes de support.

La rupture des fils aériens, pour une cause quelconque et quelque rare qu'elle puisse être, peut aussi, malgré les fils de garde qu'on dispose à cet effet, amener des accidents dont malheureusement on peut citer de trop nombreux exemples.

Il n'est donc pas surprenant qu'on ait cherché, depuis longtemps déjà, à remplacer les conducteurs électriques aériens par des conducteurs placés dans un caniveau souterrain.

Le caniveau, de forme et de dimensions variables, comme nous le verrons tout à l'heure, est placé sous la chaussée, soit dans l'axe de la voie des tramways, soit sous une des files de rails. Il est muni, à sa partie supérieure, d'une fente longitudinale qui per-

met le passage de l'appareil, remplaçant ici le trolley, et qui conduit le courant des conducteurs à l'appareil moteur des voitures.

Dans ce caniveau sont installés de place en place des supports formant isolateurs et sur lesquels reposent les fils conducteurs. Ceux-ci, étant donnée la place dont on dispose dans le caniveau, peuvent avoir une plus grande dimension que le fil aérien ; on les fait généralement en fer et leur section est disposée de manière à donner une surface de contact suffisante avec le frotteur du trolley. Habituellement aussi, avec cette disposition, le retour du courant ne se fait plus par les rails, mais bien par un second conducteur isolé, placé parallèlement au premier, et sur lequel vient appuyer un second frotteur dont est muni le trolley. On évite ainsi les actions électrolytiques. Les feeders d'alimentation et de retour de courant, lorsqu'on en juge l'emploi nécessaire, sont également installés dans ce caniveau.

Toutefois la construction de ce caniveau n'est pas aussi simple qu'elle le paraît au premier abord, car, pour donner complète satisfaction, il doit remplir un certain nombre de conditions dont la réalisation pratique n'est pas toujours facile.

1° Il doit être indéformable, c'est-à-dire que l'ouverture de la rainure longitudinale doit rester constante, sous l'influence des charges qui circulent dans la rue et sous la pression latérale due aux pavés, lorsque ceux-ci sont en bois. C'est une condition dont nous avons déjà eu à parler, à propos de la traction funiculaire.

La largeur de la rainure doit être suffisante pour laisser passer librement le trolley, mais elle ne doit pas être assez grande pour laisser s'y engager les roues des voitures ordinaires ou des bicyclettes. A Paris, elle est limitée à 29 mm.

On peut parvenir à réaliser cette condition en donnant une grande résistance à l'ossature du caniveau, mais évidemment ce sera au détriment du prix d'établissement.

2° On doit pouvoir le nettoyer très simplement et on doit également pouvoir faire évacuer facilement les eaux de pluie. Cette condition est indispensable, si on veut conserver un isolement parfait des conducteurs.

L'évacuation des eaux ne présentera pas de difficulté lorsque la rue sera pourvue d'un système d'égouts ; des niches ménagées de place en place et communiquant par leur partie inférieure, au moyen de tuyaux, avec l'égout collecteur, suffiront ; dans le cas contraire, la solution est plus compliquée et devient une question d'espèce qui peut conduire à des dépenses importantes.

Quant au nettoyage, il peut se faire facilement à l'aide d'un balai attaché à la voiture et qu'on peut promener dans le caniveau ; ce nettoyage n'a besoin, du reste, d'être fait que de temps en temps.

3° On doit pouvoir visiter, sans difficulté, les conducteurs, les feeders lorsqu'il y en a, ainsi que les isolateurs ; on doit pouvoir aussi les remplacer facilement.

Enfin nous devons ajouter une condition importante relative à la pose des conducteurs. Ceux-ci doivent occuper une position aussi élevée que possible dans le caniveau, dans le but de les mettre à l'abri des eaux qui peuvent s'y trouver. Ils ne doivent pas non plus être placés directement sous la rainure, afin d'éviter un court-circuit, dans le cas où un objet quelconque en métal, tombant par cette rainure, viendrait à toucher les deux conducteurs.

L'appareil qui relie les conducteurs électriques avec l'appareil moteur de la voiture et qui, ici, remplace le trolley, doit être muni à son avant et à son arrière d'une sorte d'éperon pour chasser tout obstacle placé dans la rainure et qui pourrait s'opposer à sa marche. Des plaques métalliques doivent le garantir contre l'usure qui se produit inévitablement par le frottement contre les parois de la rainure.

Les fils conducteurs doivent être parfaitement isolés, et les frotteurs qui prennent contact avec les conducteurs doivent être bien appuyés contre celui-ci.

Enfin, tout l'appareil formant trolley doit pouvoir prendre facilement un léger déplacement dans le sens longitudinal ou vertical de la voiture, afin de suivre exactement l'axe de la rainure et d'éviter de perdre contact avec le conducteur, lorsque la voiture passe sur les joints des rails.

De nombreuses dispositions de caniveaux ont été étudiées; mais jusqu'ici leur application a été assez restreinte.

En Europe il n'existe actuellement, à notre connaissance, que trois exemples de tramways électriques avec conducteurs et caniveaux souterrains :

1° Le tramway de Blackpool ; 2° les tramways de Budapest ; 3° deux petites lignes qui viennent d'être ouvertes à Berlin.

En Amérique, le nombre en est également très restreint. On le rencontre à Washington dans deux rues, et à New-York dans la troisième et la seizième Avenue, ainsi que dans Lenox Avenue.

Nous allons décrire succinctement les derniers types appliqués, en commençant par le tramway de Blackpool, le plus anciennement établi, puisqu'il date de 1885 ; nous nous servirons pour cela des renseignements donnés, à ce sujet, par M. Maréchal, dans son livre sur les *Tramways électriques*.

Caniveau de Blackpool. — Ce caniveau (fig. 151), placé au milieu de la voie, est formé de chaises en fonte espacées de 1 m. et reposant sur une fondation en béton ; ces chaises sont réunies

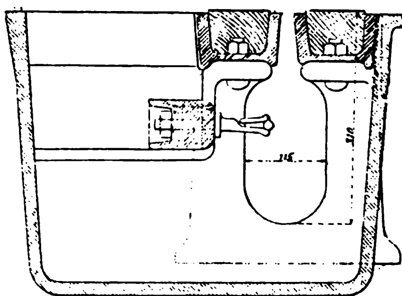


Fig. 151. — Caniveau de Blackpool.

longitudinalement à leur partie supérieure par des fers en U boulonnés sur ces chaises et laissant entre eux un espace suffisant pour la rainure ; le vide laissé par ces fers est rempli par des pavés en bois. Les parois latérales du caniveau sont formées de planches en bois.

Tous les 3 m., sont ménagés des regards, comme l'indique la

figure, dans lesquels sont disposés des isolateurs horizontaux supportant le conducteur à leur extrémité.

Ces regards permettent la visite des isolateurs, leur remplacement, et, en même temps, ils servent au nettoyage du caniveau. Il n'y a qu'un fil de prise de courant et le retour se fait par les rails, qui sont éclissés en conséquence.

La disposition que nous donnons est celle employée actuellement, le type primitif de 1885 ayant dû subir quelques modifications indiquées par l'expérience, telles que l'établissement des regards et le système d'isolement des supports des fils, supports qui, dans la première installation, ne pouvaient être visités. Dans la disposition de 1885 il y avait deux fils de prise de courant ; actuellement il n'y en a plus qu'un seul. Ce caniveau a été étudié par Holroyd Smith.

La figure 152 montre la disposition du trolley primitif à deux frotteurs réunis à la plaque *c* en laiton, à l'extrémité supérieure de laquelle est fixé le câble conduisant le courant au moteur de la voiture ; cette plaque isolée est garantie, au passage de la rainure,

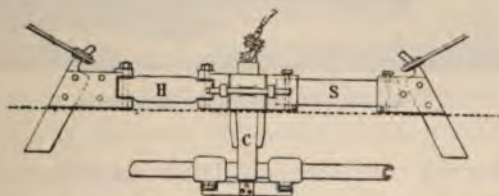


Fig. 152. — Trolley des tramways de Blackpool.

par une enveloppe en fonte. En avant et en arrière se trouvent des socs en acier, destinés à nettoyer la rainure et reliés à l'enveloppe de la plaque *c*, soit par une lame en acier S, soit par une plaque à charnière H, qui permet le mouvement latéral des socs dans cette rainure. Des cordes relient chacun des socs du trolley à la voiture et peuvent se casser, lorsque la résistance à vaincre devient trop grande, en coupant ainsi le circuit.

Caniveau de Budapest. — Ce caniveau, installé en 1889, a été étudié par la maison Siemens et Halske. Au lieu d'être placé dans

mâchoire supportée par l'isolateur. Lorsqu'il s'agit du remplacement d'un de ces conducteurs, la disposition des regards en permet facilement le déboulonnage et leur section allongée en facilite la

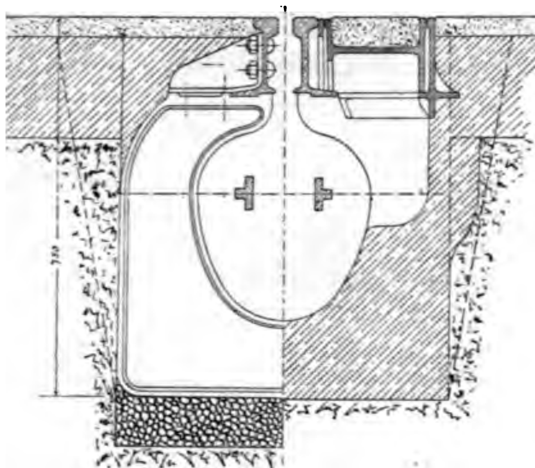
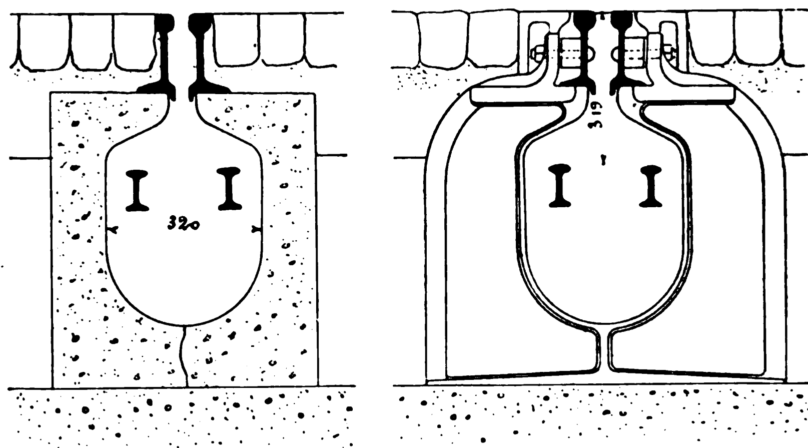


Fig. 156. — Nouveau caniveau de Budapest et de Berlin.

sortie par la rainure, ce qui était impossible avec la première disposition.



Coupe du caniveau — Élévation d'un cadre en fonte.

Fig. 157. — Caniveau de Berlin, système Thomson-Houston.

Caniveau de Berlin, système Thomson-Houston. — Il s'agit

d'une ligne de 1 200 m. de longueur à double voie ; un caniveau est installé sous chacune des files de rails intérieures.

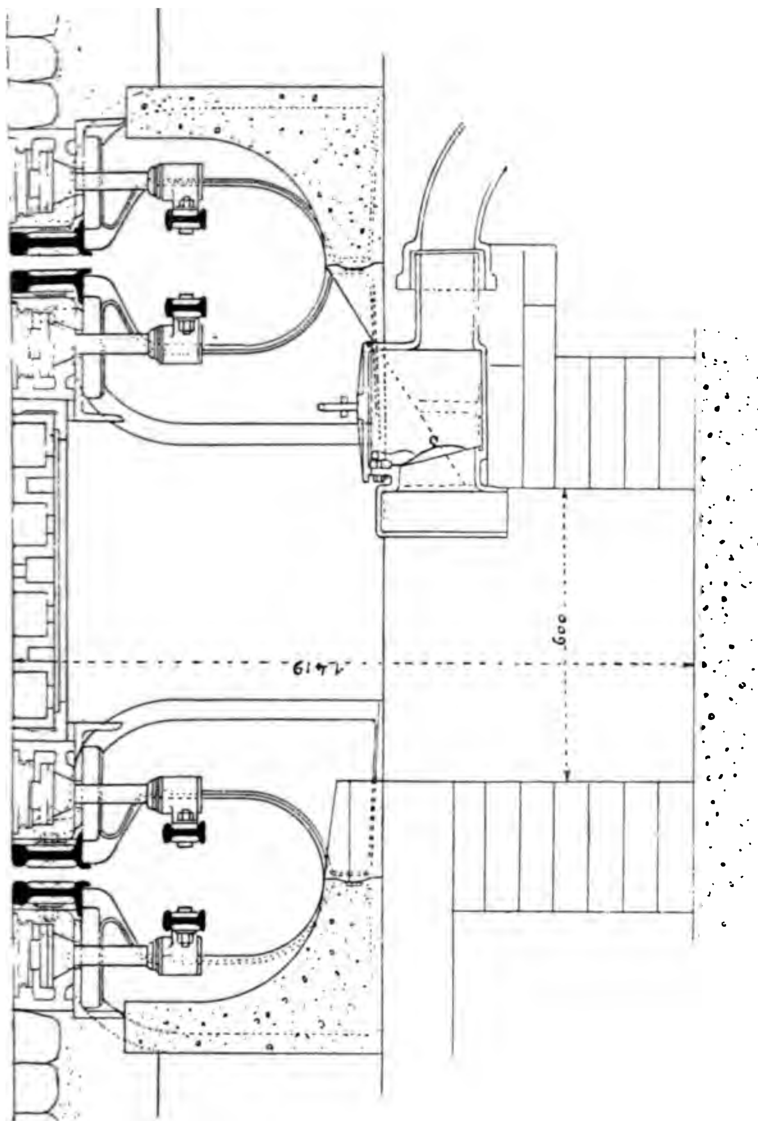
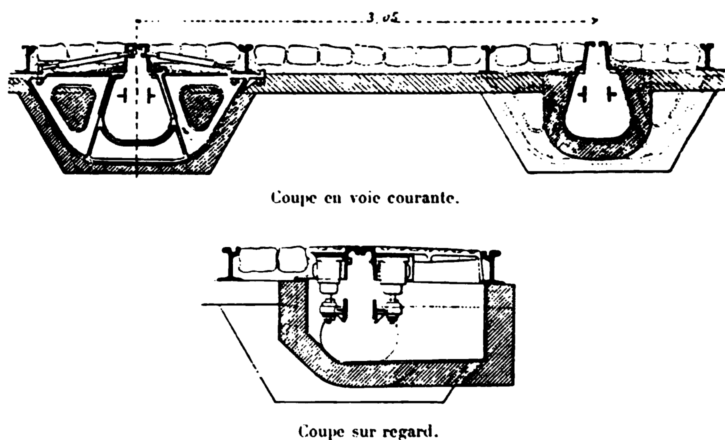


Fig. 158. — Caniveau de Berlin, système Thomson-Houston ; communication avec les égouts.

Des rails Vignole avec patin à ergot, laissant entre eux une rainure de 30 mm. d'ouverture (fig. 157), s'appuient tous les 1.20 m. sur des chaises en fonte de 0,72 m. de largeur à la base et sont

reliés au moyen de boutons à ces chaises. Un caniveau en béton remplit l'intervalle laissé entre celles-ci. Les conducteurs sont doubles, l'un pour le courant d'aller, l'autre pour le courant de retour, et ont la forme de rails Vignole ; leur longueur est de 8 m. Ces conducteurs sont supportés, à chaque extrémité, par des isolateurs verticaux fixés à des boîtes en fonte placées à la partie supérieure, entre deux chaises rapprochées exceptionnellement de 0,80 m. Ces isolateurs forment en même temps l'éclissage des conducteurs, et des regards ménagés au-dessus en permettent la visite. La figure 158 indique la disposition de ces isolateurs, ainsi que la communication des caniveaux avec les égouts.

Caniveau de Washington. système Connett. — Ce caniveau a été établi en 1895 dans la 9ᵉ rue de Washington, pour le compte de la « Metropolitan Railroad C° » ; il est placé dans l'axe de la



Coupe en voie courante.

Coupe sur regard.

Fig. 159. — Caniveau de Washington.

voie. Il se compose (fig. 159) de fermes en fonte espacées l'une de l'autre de 1,38 m. et dont l'intervalle est rempli au moyen d'un canal en béton.

La rainure, qui laisse une ouverture de 29 mm., est formée au moyen de deux fers boulonnés sur les fermes ; des tirants relient ces fers aux extrémités de la traverse pour leur donner de la rigidité.

Les conducteurs sont au nombre de deux, l'un pour l'aller, l'autre pour le retour du courant, et ont la forme de fer T, comme l'indique la figure. Ils sont supportés, de deux en deux fermes par des isolateurs verticaux, et des regards en permettent la visite.

Une ouverture de 1 m. de longueur et de 0,30 m. de largeur est ménagée tous les 120 m., dans l'axe de la chaussée, dans le but de permettre l'introduction dans le caniveau d'un rail conducteur, en cas de remplacement d'un de ceux-ci ; on le met en place en le suspendant au moyen d'une corde à un truck que l'on fait circuler au-dessus de la rainure.

Les trolleys sont du type ordinaire à frotteurs, dont le contact avec les conducteurs est maintenu au moyen de ressorts. Tout le système est suspendu à la voiture de manière à lui permettre un mouvement d'oscillation, dans le but d'éviter l'usure des plaques de frottement dans la rainure.

Caniveau de New-York, système Love. — Ce caniveau, établi dans la 3e Avenue, à New-York, est représenté par la figure 160. Les fers, formant rainure, sont fortement reliés aux rails par des tirants, dans le but de maintenir constante l'ouverture de la rai-

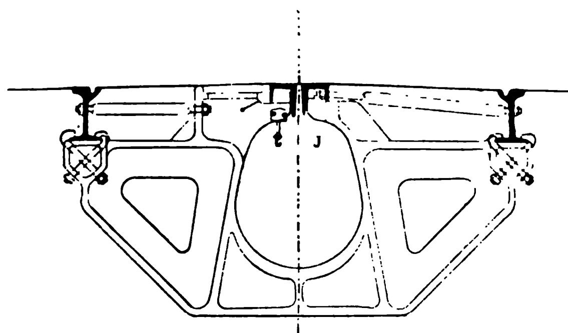


Fig. 160. — Caniveau de la troisième Avenue, à New-York.

nure. Les fermes sont espacées de 1,20 m. et l'intervalle compris entre elles est rempli par un canal en fonte reposant sur une fondation en béton.

Les conducteurs, toujours au nombre de deux, comme dans les

cas précédents, sont en cuivre et ont la forme d'un J. Ils sont supportés par des isolateurs verticaux, comme le montre la figure, et, de quatre en quatre fermes, on ménage à la partie supérieure des trous à main qui permettent la visite de ces isolateurs et leur démontage, ainsi que celui des conducteurs.

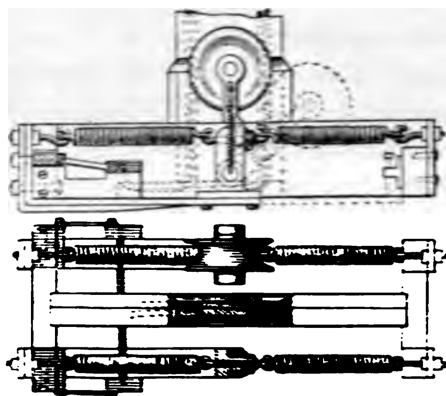


Fig. 161. — Trolley du caniveau de la 3e Avenue de New-York.

Une disposition intéressante à signaler est le mode de suspension des conducteurs aux isolateurs, qui permet la dilatation ou la contraction des premiers, suivant les variations de température.

La figure 161 montre la disposition du trolley.

Caniveau de New-York, système de la General Electric C°. — Le caniveau que nous allons décrire est le dernier type adopté par cette Compagnie et appliqué par elle aux tramways de la 16e Avenue à New-York : il est installé au milieu de la voie.

La figure 162 en indique la disposition. L'intervalle entre les fermes est en béton avec revêtement intérieur en tôle, et la rainure, formée de deux fers boulonnés sur ces fermes, laisse un intervalle de 20 mm.

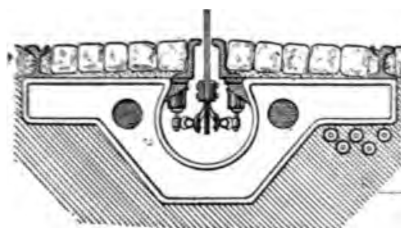


Fig. 162. — Caniveau de la *General Electric C°*, à New-York.

Les isolateurs sont verticaux et ont la forme indiquée sur la figure. Les conducteurs doubles (aller et retour du courant) sont formés de tubes en fer de 51 mm. de diamètre extérieur et de 30 mm. d'épaisseur ; leur longueur est de 9 m. Le mouvement de ces conducteurs dans le sens longitudinal, sous l'influence des variations de température, est rendu possible par la disposition

adoptée pour la suspension sur l'isolateur ; la vis qui fixe chaque conducteur au support passe dans un trou de forme elliptique.

Des regards sont ménagés au-dessus de chaque isolateur, afin d'en faciliter la visite ; quant au remplacement des conducteurs, il se fait comme nous l'avons indiqué précédemment à propos du caniveau du système Connett. Le trolley, avec frotteurs en fer pour la prise du courant, est représenté sur la figure 163. Au passage de la rainure, les fils conducteurs du courant sont protégés par deux plaques d'acier et isolés au moyen de feuilles de mica. Les plaques peuvent parcourir 11 000 km. avant d'être remplacées, et les frotteurs 3 000 km. seulement.



Fig. 163. — Trolley de prise de courant.

Ce système a, paraît-il, donné d'excellents résultats à tous les points de vue.

Nous aurions encore à parler de différents autres types de caniveaux étudiés dans ces derniers temps, tels que : le caniveau de la « Société nouvelle d'électricité », posé à titre d'essai dans la rue de Châteaudun, sur une longueur de 100 m. ; le caniveau entièrement métallique de la Société anonyme des usines de Hoerde, et enfin la galerie visitable, étudiée par la Société d'Études françaises et étrangères, et destinée à la ligne de tramways à double voie de 1 m., à établir à Paris, entre la place Cadet et la porte de Montmartre. Mais comme ces différents types, tout intéressants qu'ils sont, n'ont pas encore reçu d'application, nous ne croyons pas devoir nous y arrêter.

Dépenses d'établissement des caniveaux. — Il serait intéressant de connaître le prix de revient de ces différents types de caniveaux souterrains. Malheureusement les renseignements exacts sont rares ; de plus, il s'agit ici d'une question d'espèce, le prix d'établissement dépendant d'une foule de circonstances locales qu'il est bien difficile de prévoir à l'avance, telles que remaniements d'égouts, déplacements de conduites d'eau, de gaz, de fils télégraphiques ou téléphoniques. Il n'est donc guère possible de donner autre chose que des chiffres approximatifs.

En tenant compte des dépenses accessoires, telles que aiguillages, courbes, etc., on peut résumer comme il suit, d'après M. Maréchal, le prix d'établissement des caniveaux, la construction de la voie défalquée, bien entendu, mais en y comprenant les conducteurs électriques avec leurs accessoires, sans les feeders. Ces prix se rapportent à 1 km. de voie simple.

1°	Caniveaux de Washington	93 000 fr.
2°	— de Berlin et de Budapest	69 000 —
3°	— Thomson-Houston	100 000 —
4°	— type de la Société Nouvelle d'Electricité	86 000 —

On peut donc admettre, pour l'établissement de ces caniveaux, une dépense, par kilomètre de voie simple, de 70 à 100 000 fr., soit, pour deux voies, de 140 à 200 000 fr. ; mais, nous le répétons, ces chiffres ne représentent que des moyennes.

TRAMWAYS
AVEC DISTRIBUTION DE COURANT
PAR
CONDUCTEURS INTERROMPUS, AU NIVEAU DU SOL
(SYSTÈME CLARET-VUILLEUMIER)

La traction électrique par trolley est d'une application souvent difficile, lorsqu'il s'agit de suivre des rues étroites, tortueuses et fréquentées; il faut alors une quantité considérable de haubans transversaux et de colonnes de support qui gênent la circulation et ne sont pas irréprochables, au point de vue esthétique. La même difficulté se rencontre, quoique à un degré moindre, pour les voies larges.

La traction électrique par caniveaux souterrains évite cet inconvénient, mais elle entraîne des dépenses considérables de premier établissement.

Il était donc tout naturel de chercher un moyen terme, en établissant la prise du courant au niveau même du sol de la rue. Mais on rencontre alors une difficulté nouvelle : l'endroit où doit se faire cette prise de courant, soit au moyen de pavés métalliques, soit au moyen de rails, ne doit recevoir le courant électrique qu'au moment précis du passage de la voiture, et ce courant doit être interrompu immédiatement après son passage. On conçoit sans peine que, si cette condition n'était pas remplie, le contact entre ces points de prise de courant et les passants ou les animaux circulant dans la rue, pourrait être la cause de graves accidents.

Un certain nombre de systèmes ont été étudiés; nous pourrions

citer parmi eux le système Westinghouse, mis à l'essai dernièrement à Washington, et le système Diatto. Mais celui qui a reçu une application vraiment sérieuse est le système Claret-Vuilleumier, appliqué, en 1894, à Lyon sur une longueur de 3 200 m., le long des quais de la rive gauche du Rhône, et tout dernièrement (1896), à Paris, sur le tramway de la place de la République à Romainville.

C'est cette dernière ligne que nous allons décrire.

Elle part de la place de la République pour atteindre, en suivant les avenues de la République et Gambetta, la porte de Romainville, aux fortifications.

Cette première section est à double voie et sa longueur est d'environ 4 km; les rampes y atteignent 46 mm. par mètre dans l'avenue Gambetta, le long du cimetière du Père-Lachaise; les courbes y sont toutes de grand rayon.

La seconde section, qui fait suite à la première, commence aux fortifications et se termine à l'extrémité de Romainville, vers Noisy-le-Sec; sa longueur est d'environ 3 km.; elle est à voie unique avec garages, le peu de largeur des rues n'ayant pas permis l'établissement de deux voies. Les rampes sont faibles, mais, en certains endroits, le rayon des courbes a dû être réduit à 25 m.

En résumé, la longueur totale de la ligne est de 6 946 m. et la différence de niveau entre la place de la République et le point le plus élevé, qui se trouve aux Lilas, est de 87,37 m.

La voie est établie avec le rail Broca.

Nous allons tout d'abord indiquer la disposition générale du système.

Des dynamos génératrices sont installées à une usine centrale qui se trouve aux Lilas, c'est-à-dire aux deux tiers du parcours. Ces dynamos envoient le courant dans un conducteur principal isolé, placé souterrainement et parallèlement aux voies. A des distances régulières et également réparties, on a installé, sur ce conducteur principal, une série de branchements qui, à leur tour, envoient le courant, à mesure de l'avancement de la voiture, dans une série de pavés métalliques appelés *plots*, placés à égale distance au milieu de chaque voie. Ce sont ces plots qui amènent le courant des dynamos aux moteurs de la voiture et lui donnent force de propulsion. Mais, comme nous l'avons dit, ces plots

ne doivent recevoir le courant qu'au moment où la voiture passe au-dessus d'eux, et ce courant doit être interrompu aussitôt après son passage. On a donc dû établir, au point de jonction des branchements avec le conducteur principal, un appareil spécial, nommé *distributeur*, qui est destiné à remplir ce but.

Un frotteur, installé sous la voiture et dont la longueur est telle qu'il touche le plot suivant avant d'avoir quitté le précédent (nous verrons pourquoi), vient appuyer sur ces pavés métalliques. Ce frotteur sert de prise au courant qui sera amené ensuite par le coupleur aux moteurs de la voiture, pour faire retour à la dynamo génératrice par les rails, disposés à cet effet.

La partie originale de ce système réside donc dans l'appareil qui lance le courant au moment voulu dans les plots, pour l'interrompre ensuite; c'est-à-dire dans le distributeur et dans l'appareil qui sert à la prise du courant, c'est-à-dire le frotteur.

Nous examinerons donc plus spécialement ces deux appareils; mais auparavant nous allons décrire sommairement les différentes parties qui constituent l'installation.

Usine centrale. — L'usine centrale se compose d'une salle pour les chaudières à vapeur, d'une autre pour les machines à vapeur et les dynamos et d'une remise pour 30 voitures.

Les chaudières, au nombre de trois, sont du type semi-tubulaire à deux bouilleurs; elles sont timbrées à 8 kg. et leur surface de chauffe est de 160 m² avec une surface de grille de 3,24 m².

Les machines à vapeur sont également au nombre de trois, du type Corliss, avec condensation par mélange et pompe à air en tandem. Les cylindres ont un diamètre de 0,46 m., une course de 1,06 m. et une puissance de 170 chevaux avec une admission de un huitième; la vitesse de rotation est de 85 tours par minute. Le volant, de 5 m. de diamètre, pèse 10 tonnes.

Chaque machine à vapeur actionne, au moyen d'une courroie, une dynamo du type Huguet-Hillairet. Ces dynamos sont à quatre pôles et doivent fournir 280 ampères avec un voltage de 530 volts. soit environ 150 kw. L'excitation est hypercompound.

Il est utile d'ajouter que l'usine des Lilas doit encore, en plus de la traction des tramways, assurer l'éclairage de l'avenue de la

République et de l'avenue Gambetta, qui comporte environ 113 lampes à arc.

Le tableau de distribution, où viennent se réunir les courants produits par les dynamos, se compose de trois branches correspondant à chacune d'elles. Dans chaque division se trouve un commutateur à l'aide duquel on envoie le courant de la dynamo qui lui correspond, soit sur la ligne de tramways, soit sur la ligne d'éclairage.

L'installation est en outre munie de voltmètres, d'ampèremètres et d'interrupteurs, mais on n'y a pas ajouté de parafoudres, les conduites étant souterraines.

Conducteurs. — Le courant est amené de la génératrice G (fig. 164) par les conducteurs principaux K, aux différents dis-

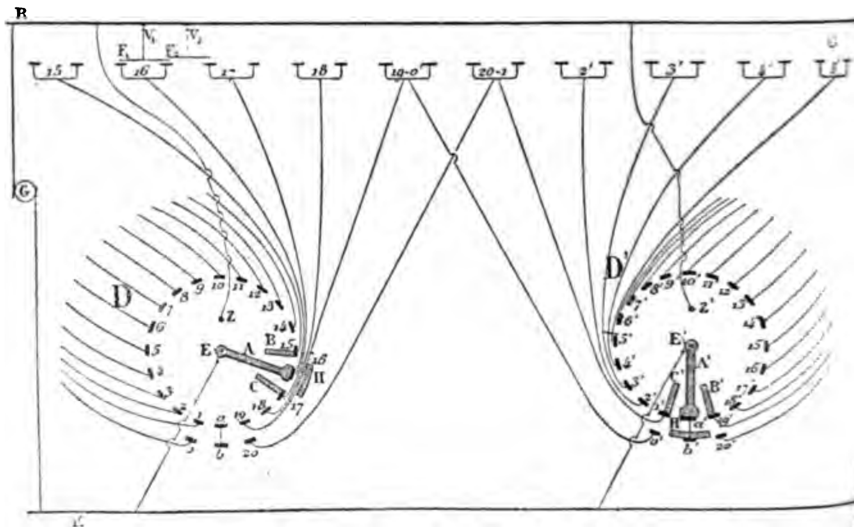


Fig. 164.

tributeurs D, D'..., placés dans des cuves installées sous les trottoirs et espacées régulièrement les unes des autres de 95 m. Nous reviendrons plus loin sur ces distributeurs. Les conducteurs principaux sont en cuivre, isolés, et ont une section de 300 mm²; ils sont placés également sous le trottoir, dans des caniveaux souterrains.

De chacun de ces distributeurs partent des fils d'alimentation,

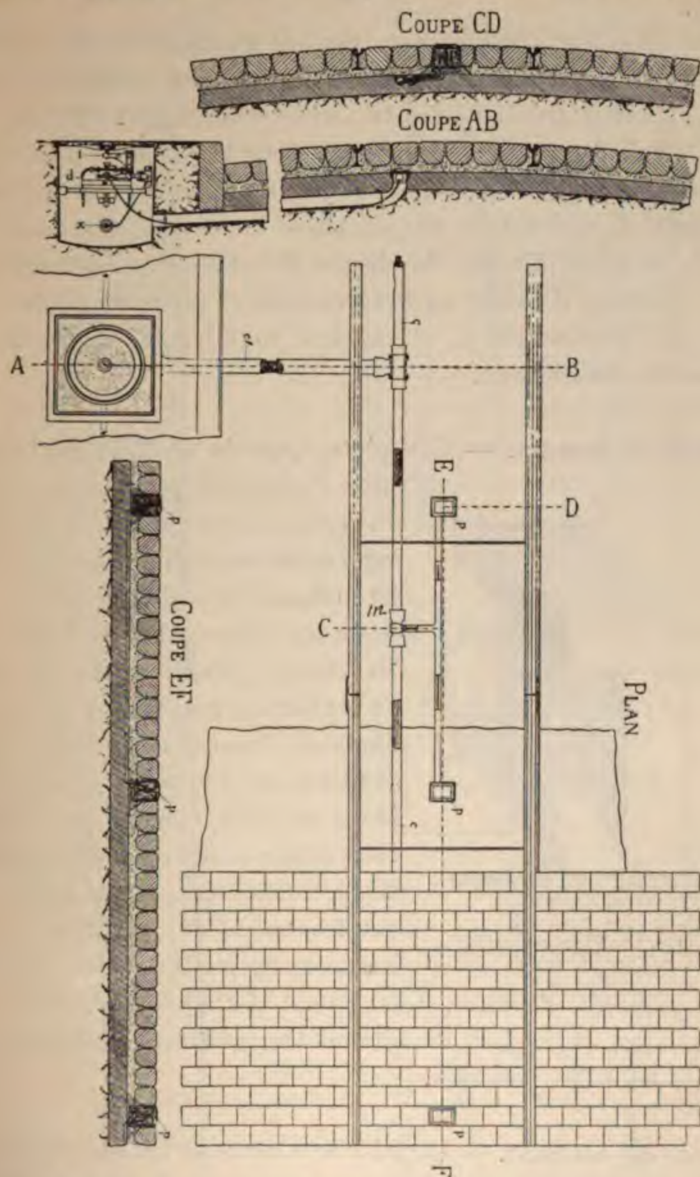


Fig. 165. — Installation des branchements du distributeur.

comme cela est indiqué sur la figure, qui relient ceux-ci avec deux plots placés dans l'axe de la voie, et espacés régulièrement de

2,50 m.; ces plots sont reliés de deux en deux par un fil métallique.

Les fils d'alimentation en cuivre ont un diamètre de 3 mm. et une section de 7 mm². Ils sont isolés avec du caoutchouc vulcanisé, et sont placés dans des tuyaux en fonte *c* (fig. 165) qui longent la voie dans toute sa longueur. Tous les 5 mètres, en regard de chaque couple de plots, réunis par un fil métallique, se trouve une boîte de raccord *m*, par où passe le fil venant alimenter ce couple de plots. En face de chaque distributeur, c'est-à-dire tous les 95 mètres, il existe un branchement *c'* qui relie celui-ci avec le canal longitudinal *c*, et contient tous les fils d'alimentation venant du distributeur.

Plots de contact. — Ces plots, espacés de 2,50 m., comme nous l'avons dit plus haut, et reliés de deux en deux par un fil de cuivre logé dans une rainure où l'on coule un mélange de brai et de bitume, ont la forme indiquée sur la figure 166. Ils étaient primitivement en fonte; on les fait aujourd'hui en acier, pour diminuer l'usure. Leur saillie sur la chaussée est d'environ 5 mm. et les bords en sont abattus pour rendre cette saillie moins sensible. La liaison du fil conducteur avec le plot se fait par frottement dur, au moyen d'une bague en cuivre D enfoncée dans des trous préparés d'avance. L'isolement des plots est obtenu par un mélange de brai et de bitume les entourant complètement, suivant les traits ponctués.

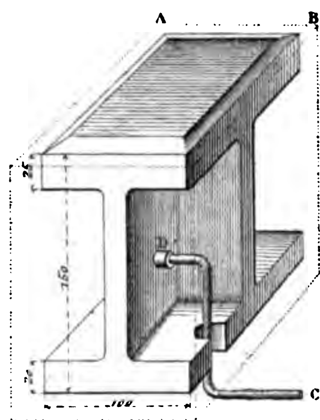


Fig. 166. — Plots de contact.

Prise de courant. — La prise de courant se fait sur les plots à l'aide d'un frotteur constitué par une barre de fer cornière *ff* (fig. 167), d'une longueur de 3,30 m. Les plots étant espacés de 2,50 m., cette barre sera toujours en contact avec l'un d'eux, dans n'importe quelle position de la voiture.

La barre cornière est placée de champ, de manière à ce que le contact soit toujours assuré, malgré la boue et la poussière ; elle

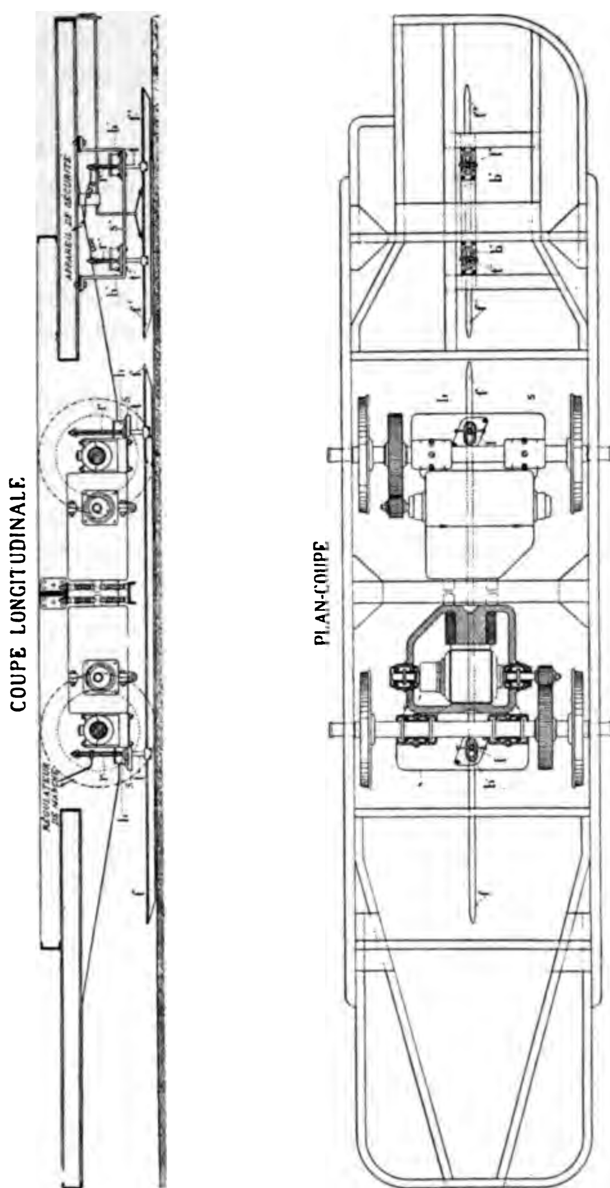


Fig. 167. — Truck et disposition des appareils moteurs des automotrices du tramway de Romainville.

est maintenue de champ, au moyen des deux tiges *t* qui peuvent coulisser dans des boîtes *b* montées sur les supports S. Les ouver-

tures dans lesquelles passent les tiges *t*, sont ovalisées et disposées de telle façon que l'entraînement du frotteur se fait toujours par la tige avant, par rapport au sens de marche de la voiture, la tige arrière ne servant plus que de guide. A la partie supérieure des tiges sont montées des traverses, aux extrémités desquelles viennent agir les ressorts *r*.

C'est sur les tiges que sont soudés les câbles isolés au caoutchouc qui se rendent aux moteurs, par l'intermédiaire du contrôleur de marche.

Moteurs. — Chaque essieu du véhicule est actionné par un moteur. La figure 167 montre la disposition de ces moteurs sur le châssis de la voiture.

Ils sont enfermés dans des caisses en fonte de 0,41 m. de haut, 0,725 m. de long et 0,725 m. de large, reposant, au moyen de deux tourillons, sur les essieux. Du côté opposé, les caisses portent des oreilles pouvant coulisser sur des tiges, et sont maintenues en équilibre par des ressorts. Ces ressorts prennent leur point d'appui en haut sur un fer double T, et en bas sur un fer en U, tous les deux fixés au châssis de la voiture. Les axes des moteurs sortent de chaque côté de la caisse et se terminent, d'un côté, par un pignon qui engrène avec une roue dentée, calée sur l'essieu. Ces engrenages sont en acier fondu et laissés à l'air libre, sans graissage. La réduction de vitesse est dans le rapport de 1 à 5.

Chaque moteur est calculé pour développer une puissance maximum de 30 chev. L'induit est en anneau de 0,362 m. de diamètre et de 0,350 m. de longueur; le collecteur a 0,100 m. de largeur. L'excitation en série est fournie par une bobine de 0,225 m. de longueur enroulée sur un noyau horizontal très court. Les pièces polaires sont placées sur les côtés de l'anneau, l'une montée directement sur le noyau inducteur, l'autre faisant corps avec la paroi latérale de la caisse; le circuit magnétique réunissant les pièces polaires se trouve donc constitué par la caisse en fonte elle-même.

Les variations de vitesse sont obtenues au moyen du contrôleur de marche placé sur la plate-forme d'avant. Le démarrage se fait par le couplage en série des deux moteurs, avec une résistance

introduite dans le circuit, et l'augmentation de vitesse s'obtient en réduisant successivement cette résistance. Enfin, si on veut obtenir une plus grande vitesse, on réunit les deux moteurs en parallèle avec une résistance qu'on réduit encore successivement jusqu'à la vitesse maximum. Le coupleur est également disposé pour permettre le freinage électrique de la voiture, en faisant travailler les dynamos motrices comme génératrices, sur des résistances variables.

La marche en arrière s'obtient en renversant le sens du courant dans les inducteurs. On peut également marcher avec un seul moteur, l'autre étant isolé.

Voitures. — Les voitures sont à impériale couverte; elles contiennent 26 places d'impériale, 20 places d'intérieur et 6 de plate-forme, ce qui fait en tout 52 places. Leur poids à vide est de 9 t. et en charge de 13 t. La longueur totale de la voiture, entre tampons, est de 8,85 m.

En arrière de la plate-forme d'avant se trouve un espace fermé qui sert de fourgon à bagages.

Une sablière, mise à la disposition du wattman, sert à éviter le patinage dans les rampes.

L'éclairage est obtenu par 10 lampes à incandescence de 16 bougies et 105 volts, disposées en série et alimentées par deux circuits pris sur les fils des moteurs. Un seul circuit est allumé, le second servant de réserve en cas de besoin.

Il y a enfin à l'avant de la voiture un chasse-pierres et une brosse destinée à nettoyer les plots avant le passage des frotteurs.

Retour du courant. — Le retour du courant se fait, comme nous l'avons dit, par les rails. A cet effet l'éclissage est complété par des fils de cuivre réunissant les extrémités des rails, suivant la méthode que nous avons décrite à propos du système de traction par trolley.

En plus, des feeders parallèles aux rails, reliés avec eux de place en place et installés sous le pavage, augmentent la section de passage de ce courant de retour.

Il nous reste maintenant, pour terminer, à parler de l'appareil

qui fait l'originalité du système, du distributeur, ainsi qu'à en décrire le fonctionnement.

Distributeur. — Reportons-nous à la figure 164. La dynamo G de l'usine centrale envoie le courant dans le conducteur principal K, et de là, par un branchement, dans chacun des distributeurs D, D'..... qui commandent chacun vingt groupes de deux plots, le dernier groupe (20-1) étant commun avec le distributeur suivant.

Chaque distributeur se compose : d'une couronne fixe de contacts 1,2,3..... 19, et, en plus, de trois autres contacts fixes 0-*b*-20; d'une partie mobile formée de quatre manettes A,B,C, plus un frotteur H' reliés ensemble mécaniquement, mais isolés électriquement les uns des autres et pouvant tourner autour de l'axe E. La manette A est seule reliée électriquement avec l'axe E; elle peut donc recevoir le courant venant du conducteur principal, et, par conséquent, de la dynamo génératrice.

Suivant la disposition indiquée sur la figure, le frotteur de la voiture occupe la position F_1 et appuie sur les deux plots 16; le courant passe donc du conducteur principal K dans les moteurs de la voiture, par E-A-16 et les deux plots 16, et la fait avancer. Le frotteur prend alors la position F_2, et, comme il est plus long que l'espacement de deux plots consécutifs, il appuie à la fois sur l'un des plots 16 et sur le premier plot du groupe 17 qui suit.

Le courant qui passe par E-A-16 se divise donc en deux : une partie se rend aux moteurs de la voiture et l'autre revient par le plot 17 à la manette C. Arrivé en C, ce courant dérivé retourne au pôle négatif de la dynamo génératrice par Z et les rails de la voie; mais, entre C et Z, se trouve un appareil que nous décrirons tout à l'heure et qui fait tourner d'un cran la manette A et l'amène en 17, la manette C occupant alors la position 18. Le frotteur de la voiture sera à ce moment sur les deux plots 17, et le courant passera donc, comme tout à l'heure, par E-A-17 et les deux plots 17, dans les moteurs de la voiture; celle-ci avancera et le frotteur viendra toucher à la fois un des plots du groupe 17 et le premier plot du groupe 18; un courant dérivé se produira alors, comme tout à l'heure, en faisant avancer encore d'un cran la manette A.

Le même effet se reproduira jusqu'à ce que la manette A occupe la position 19, la manette C étant en *a*. Dans cette position les moteurs de la voiture seront actionnés par le courant K-E-A-19 et les deux plots 19 ; le frotteur de la voiture, avançant, viendra en contact avec le dernier plot du groupe 19 et le premier du groupe 20. Le courant, dérivé dans le groupe 20-1′, se divisera à son tour en deux ; l'un reviendra, par 20-20-*b* et la manette de contact H, au contact *a*, auquel *b* est relié électriquement par le fil *ab*, et de là, au rail par *z*, en faisant, comme tout à l'heure, avancer d'un cran la manette A et l'amenant en *a*, au point de repos. La seconde partie du courant dérivé viendra du groupe 20-1′ au contact 1′ du distributeur suivant D′ ; puis, passant par la manette C′, se rendra par Z′ au rail servant de conduite de retour ; mais en passant il aura fait avancer d'un cran l'appareil mobile du second distributeur D′, et la manette A′ occupera la position 1′, et C′ la position 2′.

A ce moment, la voiture quitte la section alimentée par le distributeur D, et celui-ci restera au repos jusqu'à ce qu'une nouvelle voiture pénètre dans sa section. A son tour, le distributeur D′ va entreren jeu, et les mêmes effets que ceux dont nous avons parlé à propos du premier distributeur, vont se reproduire jusqu'à ce que la voiture soit parvenue à l'extrémité de la section qu'il alimente et que la manette A′ soit revenue en *a*′ et ait mis en prise le distributeur suivant. Les mêmes effets se reproduisent jusqu'à l'extrémité de la ligne.

Lorsque la voiture marche dans la direction opposée, les distributeurs fonctionnent exactement de la même manière, mais le courant qui actionne l'appareil de rotation des manettes passe par l'autre manette extrême B ou B′, et la rotation a lieu en sens inverse.

Nous avons dit tout à l'heure que le courant dérivé qui passe par C et retourne au pôle négatif de la dynamo génératrice par Z et les rails, actionne entre C et Z un appareil qui a pour mission d'opérer la rotation de l'appareil mobile qui supporte les manettes A, B, C et H. Nous allons indiquer comment est constitué cet appareil.

Nous avons vu que, lorsque la manette A est sur le contact 16 et

que le frotteur de la voiture est en F_2, c'est-à-dire à cheval :
les deux groupes de plots 16 et 17, le courant dérivé revient à
manette C par le contact fixe 17.

En se reportant aux diagrammes I et II (fig. 168) on voit que
courant dérivé se dirige de *c* vers le contact m_1, le frotteur X_1 p
vers Z, relié au pôle négatif de la dynamo génératrice. Sur :

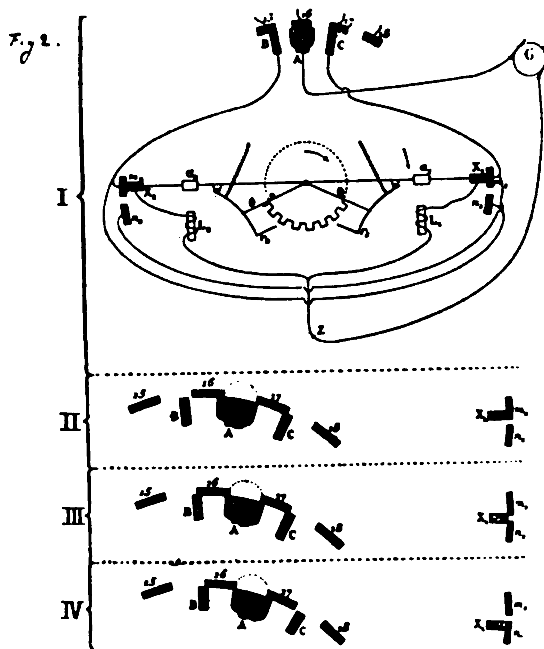


Fig. 168.

chemin, il actionne l'électro-aimant L_1 qui attire l'armature *a*
faisant tourner le levier X_1 a_1 a_2 X_2 autour de l'axe du distribute
Dans ce mouvement, le cliquet r_1 s'engage dans la roue denté
et la fait tourner, en entraînant les manettes A-B-C-H, avec
quelles elles sont reliées.

Mais on ne peut faire ainsi tourner ces manettes que d'un de
cran, puisque (diagramme IV) le frotteur C ne reçoit plus de c
rant lorsque A est à cheval sur les contacts 16 et 17. Mais alo
frotteur B intervient et établit une dérivation par n_1 X_1 L_1 Z.

Quand le frotteur A est arrivé exactement sur 17, on retrouv
diagramme I et toutes les manettes ont tourné d'un cran. Le c

rant de l'électro L_1 est alors interrompu, et, au moyen des ressorts, le bras X_1 X_2 revient dans sa position primitive.

C'est l'électro-aimant L_2 qui sert pour la marche en arrière.

L'ensemble du distributeur est représenté sur la figure 169. On voit en T T les vingt contacts fixes isolés dont nous avons parlé, et sur lesquels viennent frotter les trois manettes A B C, formées

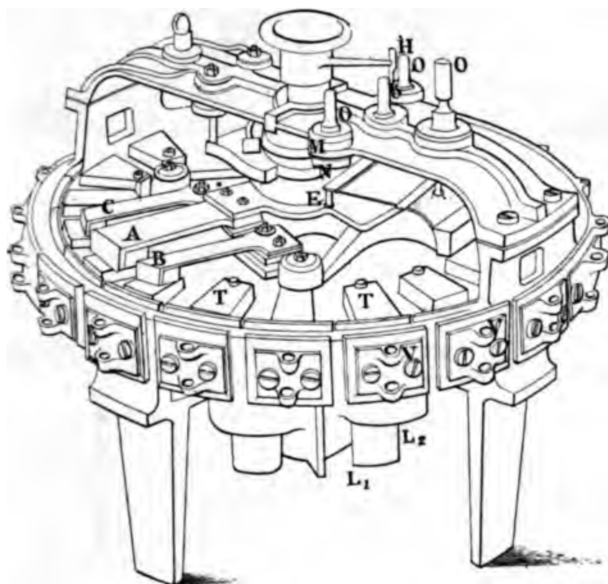


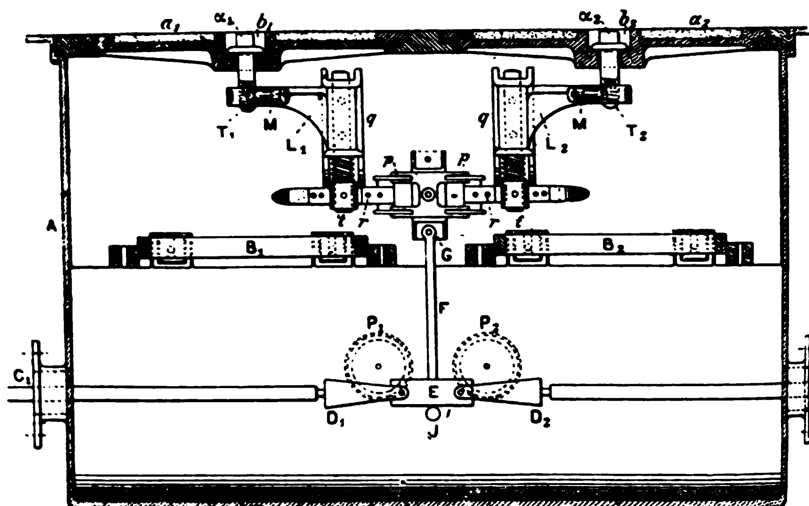
Fig. 169. — Distributeur.

d'une série de lames de cuivre flexibles. Les plaques verticales en laiton, isolées et munies de douilles V, servent de point d'attache aux différents fils conducteurs reliant le distributeur avec les groupes de plots. On voit en dessous de l'appareil les électro-aimants L_1 L_2 qui doivent opérer la rotation des manettes A B C.

Ces distributeurs sont, comme nous l'avons dit, placés tous les 95 mètres et sont simples ou doubles, suivant que la voie de tramway est unique ou double.

La figure 170 représente en plan et en élévation un poste de deux distributeurs. Les appareils sont enfermés dans une caisse en fonte A de 1,36 m. de longueur, 0,77 m. de largeur et 0,89 m. de hauteur,

fermée par un couvercle affleurant le niveau du trottoir et percé de deux ouvertures b_1 b_2, disposées en regard du centre des distribu



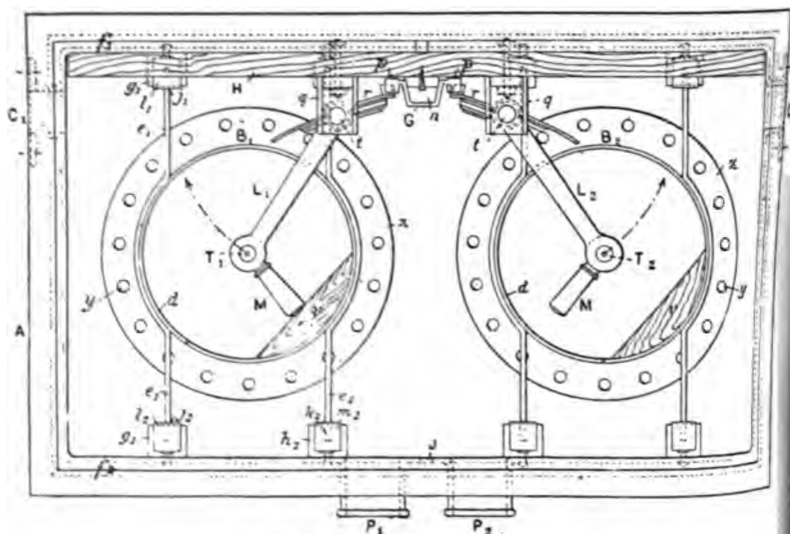


Fig. 170. — Poste de deux distributeurs.

teurs. Ceux-ci reposent sur deux supports B_1 B_2 placés à 0,43 m. au-dessus du fond, afin de les mettre à l'abri de l'eau qui pourrait séjourner au fond de la cuve. Ces supports sont formés d'un cercle d.

fixé sur deux traverses cintrées e_1 e_2 encastrées dans les parois de la cuve et isolées au moyen de blocs de caoutchouc l_1 l_2 m_1 m_2.

Le distributeur repose sur ce support par les quatre saillies horizontales en fonte qu'on voit sur la figure précédente, et qui appuient sur la couronne *d*.

Les câbles qui pénètrent dans la cuve des distributeurs sont disposés au fond de cette cuve, au-dessous des supports. Le conducteur principal venant de la dynamo génératrice traverse la cuve longitudinalement, en pénétrant par la tubulure c_1 et en sortant par la tubulure c_2. Coupé au milieu de cette cuve, ses extrémités D_1 et D_2 sont dénudées et soudées dans deux armatures en laiton, vissées elles-mêmes sur une pièce de raccord E en forme de T. L'extrémité supérieure de ce raccord en cuivre est fixée sur une pièce de contact verticale en laiton G, montée sur la paroi longitudinale f_1 de la cuve, avec interposition d'une plaque de porcelaine *n* et d'une grande planche en bois H. La pièce de contact G porte de chaque côté deux lames verticales flexibles *p* en cuivre.

Le courant amené en G, avant de se rendre à chaque distributeur, traverse deux commutateurs L_1 L_2 placés au-dessus du distributeur ; ces commutateurs sont formés d'une lame de cuivre *r*, solidaire d'un grand levier à manette M et mobile autour d'un axe portant un ressort de rappel énergique. La pièce *q*, fixée sur la planche en bois H, sert de pivot à l'axe *t* du commutateur et porte un coupe-circuit. Le courant, après avoir traversé la lame *r* et l'axe *t* du commutateur, puis le contact et le coupe-circuit de la pièce *q*, se rend au distributeur par un fil souple en cuivre, isolé au caoutchouc et terminé par une cheville en laiton que l'on introduit dans une douille montée sur le distributeur.

Le fil négatif du distributeur, qui est isolé au caoutchouc et relié aux rails de la voie, pénètre dans la cuve par le petit trou J percé dans la paroi longitudinale f_2, et est terminé par une fiche en laiton que l'on introduit dans une douille disposée à cet effet sur le distributeur.

Les fils de branchement qui partent de chaque distributeur pour aller aux plots de la voie, sortent de la cuve par deux tubulures P_1 P_2 ménagées sur la paroi longitudinale f_2. Ces fils traversent par les trous *y* une couronne en bois, fixée sur le support du dis-

tributeur, et se trouvent ainsi disposés d'eux-mêmes en face des douilles correspondantes du distributeur, dans lesquelles on les fixe.

Le commutateur $L_1 L_2$, dont nous venons de parler, a été établi dans le but d'empêcher la manœuvre ou l'enlèvement du distributeur, tant que celui-ci reçoit le courant du pôle positif de la dynamo génératrice. Dans la position normale, la manette M du commutateur se trouve exactement au-dessus de la partie centrale du distributeur, et toute manœuvre de celui-ci est rendue impossible. Pour la rendre possible, il faut écarter la manette M dans le sens de la flèche, ce qui coupe la communication avec le conducteur principal de distribution.

En temps ordinaire, le commutateur est arrêté dans sa position de prise de courant par un bouchon z_1, posé dans l'ouverture b_1 du couvercle et vissé sur la tête T_1 du commutateur. Avant d'ouvrir la cuve, il faut donc avant tout dévisser le bouchon z_1, ce qui, en même temps, rend libre la manette M du commutateur.

Croisements. — Dans le cas de croisement de deux lignes distinctes, on dispose les plots (fig. 171) de manière à avoir au centre du croisement un plot commun à un plot de chacune des lignes.

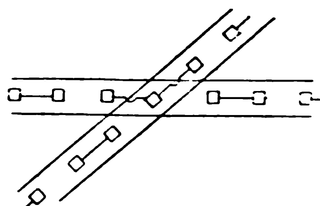


Fig. 171. — Croisement.

Ce plot commun est relié à un contact quelconque d'un distributeur de chaque ligne, pourvu que ce contact ne soit pas un des deux derniers du distributeur. Lorsqu'un véhicule pénètre au point de croisement, sur une ligne ou sur l'autre, le circuit de la voiture est mis en relation avec les trois plots centraux, et par conséquent avec le contact relié au patin commun dans le distributeur de chaque ligne. Mais ce contact ne forme un circuit fermé que dans le distributeur de la ligne parcourue par la voiture ; le distributeur de l'autre ligne étant au repos, le contact mis en relation avec la voiture restera isolé. La voiture traversera donc le croisement sans influencer le distributeur de l'autre ligne.

Aiguillages. — On s'arrange toujours pour que l'aiguillage soit établi à la fin d'une section de distribution D de la voie unique (fig. 172), de manière à ce que, à partir de l'aiguille, commence sur chacun des branchements une section nouvelle alimentée par les distributeurs D′ ou D″.

Le groupe de plots 19-*o′*-*o″*, qui précède l'aiguille, est commun aux trois voies; il est relié au contact 19 du distributeur D et

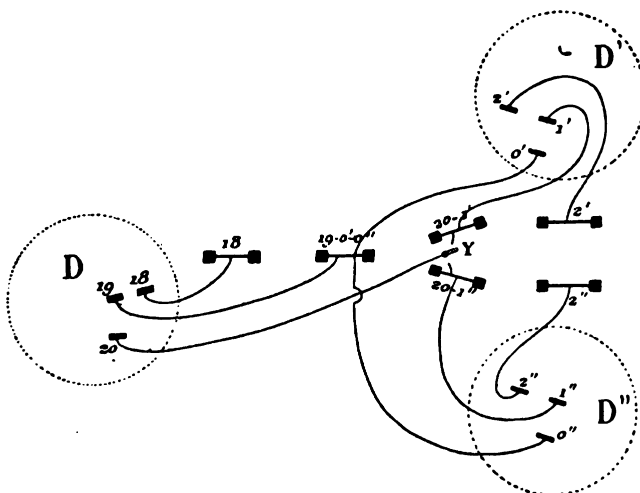


Fig. 172. — Aiguillage.

forme l'avant-dernier groupe de la voie unique; il est relié en même temps au contact *o′* du distributeur D′ et au contact *o″* du distributeur D″.

Sous l'aiguille se trouvent deux groupes de plots rapprochés l'un de l'autre et formant le second groupe de chacun des branchements; le groupe 20-1′ est relié au contact 1′ du distributeur D′ et le groupe 20-1″ au contact 1″ du distributeur D″. Le dernier groupe de la voie unique, c'est-à-dire celui qui est relié au contact 20 du distributeur D, est formé par l'un des deux groupes 20-1′ ou 20-1″, suivant que l'aiguille électrique Y est en contact avec l'un ou l'autre de ces groupes, suivant le sens de l'aiguillage.

Dans le cas du passage de la voie unique sur l'un ou l'autre des branchements, on met au préalable l'aiguille sur le branchement

que l'on veut suivre, en mettant en contact la pièce Y avec le groupe 20-1', par exemple.

Lorsque la voiture sera sur le groupe 19-o'-o'', le courant venant du contact 19 du distributeur D actionnera le moteur de la voiture, mais les distributeurs D' et D'' resteront au repos, les contacts o' et o'' étant isolés. Lorsque le frotteur de la voiture sera parvenu sur le premier plot du groupe 20-1' (l'aiguillage étant fait dans ce sens), le courant dérivé par ce groupe se rendra d'abord par Y-20 au distributeur D, et amènera la manette A au repos sur le contact *a*, et ensuite au contact 1' du distributeur D', ce qui fera avancer d'un cran la manette A du distributeur D' et amènera ce dernier à son fonctionnement régulier, la voiture continuant sa marche comme si aucun aiguillage n'avait eu lieu. Quant au distributeur D'', il ne fonctionnera pas, puisqu'il n'y a aucun contact avec l'aiguille Y.

Les mêmes effets se reproduiraient si l'aiguille Y était en contact avec le groupe 20-1'', mais ce serait alors le distributeur D'' qui serait mis en jeu.

C'est donc par la manœuvre de l'aiguille électrique Y que le branchement de la voiture sera fait, soit à droite, soit à gauche. Au tramway de Romainville, toutes les aiguilles commandant les garages étant abordées en pointe du même côté, l'aiguille électrique Y peut être maintenue constamment dans la même position.

Si, au contraire, la voiture vient de l'un des branchements pour se rendre sur la voie unique, le groupe 20-1' ou 20-1'' forme l'avant-dernier groupe de la section quittée, et l'aiguille Y le premier groupe de la section attaquée ; ces deux groupes ne jouent donc aucun rôle.

L'aiguille électrique Y peut donc être en contact avec le groupe du branchement en marche, ou avec le groupe de l'autre branchement, ou même rester dans une position intermédiaire.

Le passage du branchement à la voie unique, c'est-à-dire le fonctionnement simultané des deux distributeurs, se fera seulement au moment où le frotteur de la voiture appuiera sur le groupe 19-o'-o'', qui forme le dernier groupe de la section quittée et le second groupe de la section attaquée.

Appareil de sûreté. — Il est bien évident que, d'après le principe même du système, et en marche normale, il n'y a rien à craindre pour les passants et les chevaux circulant sur la voie ; les plots étant isolés *immédiatement* après le passage du frotteur, ceux-ci ne peuvent recevoir aucune décharge électrique. Toutefois, il y a lieu de tenir compte des incidents qui peuvent se produire accidentellement pendant la marche, tels que retards du distributeur sur la marche du frotteur de la voiture. Dans ce cas, le plot reste en communication avec la conduite principale de distribution du courant, et comme la voiture ne le couvre plus, tout contact avec lui aura pour résultat la décharge électrique d'un courant ayant une tension de 500 volts.

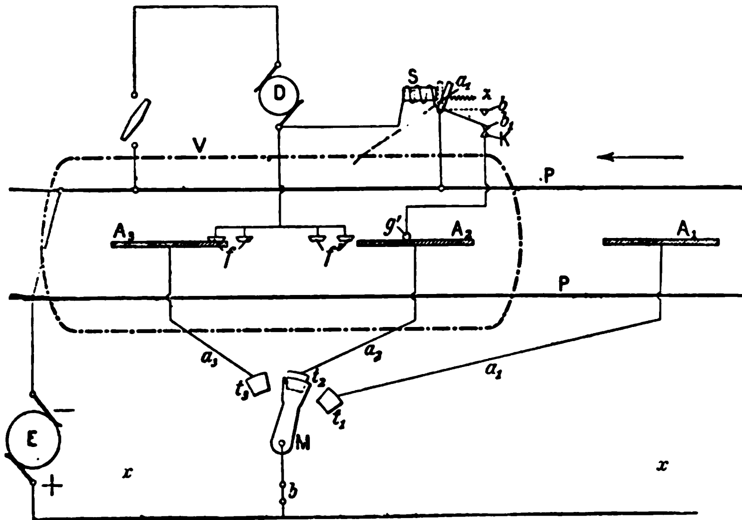


Fig. 173. — Appareil de sûreté.

Dans le but d'éviter cet inconvénient, on a installé, sous chaque voiture, un appareil de sûreté qui a pour but de décharger le plot en coupant la communication du câble de distribution x (fig. 173) avec la voie, dans le cas de dérangement du distributeur. La figure indique le schéma de ce dispositif. Le galet g', qui frotte sur les plots, se trouve à une distance du frotteur f' inférieure à la longueur d'un groupe ; il est isolé du châssis de la voiture et relié au contact K placé également sur la voiture. Celle-ci

porte en même temps un électro-aimant S, muni d'une armature rappelée par un ressort *z*. L'électro-aimant S, qui est très résistant, est relié d'une part aux frotteurs et d'autre part au châssis de la voiture. Lorsque le distributeur fonctionne régulièrement, l'électro-aimant S se trouve constamment en dérivation entre les deux pôles de la dynamo, et l'armature *a b* étant attirée, le contact K est ouvert et le galet *g'* est isolé.

Si, à un moment donné, comme l'indique la figure, le distributeur s'arrête en Mt_2 A_2, le courant n'arrivant pas en A_2, l'électro S, ne recevant plus le courant, laisse tomber l'armature *ab* qui vient toucher le contact K. Le câble de distribution *x* et la voie de roulement P sont alors réunis en court-circuit par le galet *g'* et le contact t_2, et le plomb fusible *b* du distributeur saute.

Exploitation et résultats d'expérience. — La Compagnie possède 20 voitures, dont 18 en service. Les départs ont lieu, dans les deux sens, toutes les dix ou quinze minutes, sauf des départs supplémentaires, en cas d'affluence de voyageurs.

La vitesse moyenne de marche, en tenant compte des arrêts réglementaires, est d'environ 9,6 km. à l'heure ; la vitesse normale entre les arrêts est de 12 km. à l'heure, vitesse que l'on cherche à maintenir constante sur les rampes.

La puissance absorbée par les moteurs varie donc beaucoup suivant le profil. Des expériences ont donné les résultats suivants : entre les Lilas et Romainville, où les rampes sont très faibles, l'intensité du courant par voiture varie entre 10 et 15 amp., ce qui, avec une tension de 525 volts, qui est celle admise, donne une puissance de 5,25 à 7,87 kw.

Dans l'avenue Gambetta, sur des rampes de 20 à 30 mm., cette intensité de courant est de 30 à 40 amp., soit 15,75 à 21 kw.

Sur la rampe de 46 mm., le long du mur du cimetière du Père-Lachaise, l'intensité du courant atteint 60 à 65 amp., soit une puissance de 31,5 à 34,12 kw.

D'après M. Jacquin, dans son étude sur le tramway de Romainville, publiée dans l'*Eclairage Électrique*, et à laquelle nous avons dû faire de nombreux emprunts, on a observé pratiquement qu'à l'usine centrale une dynamo génératrice de 150 kw. suffisait

pour desservir un nombre de voitures montantes et descendantes égal à 10, ce qui donne par voiture une moyenne de 15 kw.[1].

Dépense de premier établissement. — Il est bien difficile de donner un chiffre exact représentant la dépense de premier établissement, correspondant aux conducteurs principaux d'alimentation du courant, aux distributeurs, aux fils secondaires d'alimentation, aux plots, ainsi qu'aux différents accessoires de la canalisation. Nous ne pouvons que citer les chiffres donnés par les auteurs du système. M. Vuilleumier donne, comme prix d'établissement de 100 m. de longueur de voie unique, le chiffre de 2154,70 fr. soit 21,55 fr. par mètre.

Ce chiffre paraît faible, et de plus on n'a pas indiqué le nombre de voitures en circulation ; ce nombre de voitures est cependant important à connaître, puisque de lui dépend la section du câble principal d'alimentation du courant, dont la dépense entre pour une grande part dans le prix total. Ce qu'on peut dire, toutefois, c'est que ce prix de premier établissement est intermédiaire entre celui du système par trolley et celui par conducteurs souterrains ; il paraît se rapprocher plutôt de celui du premier système.

Avant de terminer, nous devons dire quelques mots des différents incidents qui peuvent se produire en cours d'exploitation et qui sont la conséquence directe du système, c'est-à-dire qui sont dus, soit aux distributeurs, soit au frotteur de la voiture.

Une première condition, c'est qu'une voiture ne s'engage jamais sur une section déjà occupée par une autre voiture, car

[1] Si, en nous servant de la méthode que nous avons indiquée au chapitre relatif aux efforts de traction, nous calculons la résistance moyenne par tonne pour le parcours entier, aller et retour, en admettant une résistance moyenne de 13,5 kg. en palier et 32 arrêts sur tout le parcours (16 en allant, 16 en revenant), nous trouverons que cette résistance atteint 19 kg. par tonne, soit une augmentation de 5,5 kg.

L'effort nécessaire en kilowatts, à l'usine, pour la traction de chaque voiture pesant 13 t. en charge, marchant à 10 km. en moyenne à l'heure, en tenant compte des arrêts et avec un rendement moyen de 50 p. 100 entre la jante et la dynamo génératrice, sera de :

$$\frac{13 \times 19 \times 2,80 \times 9,80}{0,50} = 13,594 \text{ kw.}$$

chiffre se rapprochant de celui indiqué comme moyenne par M. Jacquin.

évidemment dans ce cas, en se reportant au mode de fonctionnement du distributeur, la seconde voiture pénétrant dans cette seconde section s'arrêterait ; pour la remettre en marche, il faudrait attendre la sortie de la section de la première voiture, et manœuvrer le distributeur à la main pour l'amener sur le contact correspondant au groupe de plots sur lequel la seconde voiture est arrêtée.

Comme les distributeurs sont espacés de 95 m., il en résulte que les voitures ne peuvent jamais se rapprocher l'une de l'autre à une distance inférieure à cet espacement ; sur les lignes peu chargées cet inconvénient ne serait pas grave, mais en cas d'encombrement, comme cela arrive souvent dans les rues fréquentées, cet inconvénient risquerait d'amener des complications dans le service.

On pourrait, il est vrai, y remédier en rapprochant les distributeurs, mais leur nombre augmenterait alors, et, par suite, les dépenses de premier établissement. On retomberait dans le même inconvénient que celui reproché aux systèmes Westinghouse ou Diatto, où des appareils mécaniques ou magnétiques de prise de courant se trouvent à chaque plot de contact, et entraînent par conséquent une dépense d'établissement très élevée.

Un autre incident qui peut se produire et amener l'arrêt de la voiture, c'est lorsque le courant n'arrive plus aux moteurs, par suite du retard de la manette du distributeur sur la marche du frotteur de la voiture ; le plus souvent, dans ce cas, le coupe-circuit du distributeur est fondu.

Il faut, dans ce cas, ouvrir la cuve du distributeur, remplacer le fil fondu et ramener à la main le distributeur au contact correspondant au groupe de plots sur lequel la voiture se trouve.

Ce retard dans la marche de l'appareil est presque toujours causé par un défaut de contact du frotteur de la voiture sur les plots, dû souvent à un obstacle, même très faible, venant s'interposer entre le frotteur et le plot. C'est du reste pour éviter cet inconvénient qu'on met en avant de la voiture un chasse-pierres et un balai destinés à dégager et à nettoyer les plots.

La remise en état du distributeur entraîne, dans ces circons-

tances, un arrêt bien connu des habitués de la ligne et qui dure de deux à quatre minutes.

Mais lorsque l'incident dont nous venons de parler vient, non plus d'une circonstance fortuite, mais bien d'un dérangement, soit mécanique soit électrique du distributeur, l'arrêt de la voiture peut durer plus longtemps, car il faut enlever le distributeur, le remplacer par un nouveau, qu'on a soin du reste d'avoir toujours en réserve sur chaque voiture, et refaire toutes les connexions avec les différents branchements conduisant aux plots. Dans ce cas, il faut compter sur un arrêt de huit à dix minutes, et si un incident de ce genre se reproduit souvent, il est aisé de comprendre qu'il amènera une perturbation complète dans le service.

Il reste enfin à examiner comment se fait le fonctionnement des appareils lorsque la chaussée est couverte de boue, d'eau ou de neige.

Pendant les cyclones du 26 juillet et du 30 septembre 1896, les appareils ont continué à bien fonctionner; sur certaines parties de la ligne, on a pu franchir sans difficulté des nappes d'eau qui couvraient la chaussée sur une épaisseur de 0,15 m. à 0,20 m. environ, et cela pendant quelques jours, comme en certains points bas, entre les Lilas et Romainville.

L'eau ne paraît donc pas être un obstacle au fonctionnement du système. En sera-t-il de même de la neige et de la gelée ? L'expérience seule pourra le démontrer, et pour cela nous devons attendre un hiver moins clément que celui que nous venons de traverser.

La ligne n'ayant été ouverte que le 1er juillet 1896, [illegible] difficile de donner, même approximativement, le prix [illegible] de la traction avec ce système; il y a cependant [illegible] que ce chiffre est peu différent de celui [illegible] trique avec trolley, puisque ce système [illegible] que par l'installation et l'entretien des [illegible] courant, qui sont, nous devons le [illegible] et dont on ne connaît pas les dép[illegible] d'exploitation suffisante.

FREINS

L'étude des moyens dont on doit disposer pour arrêter les véhicules en marche, est une question d'une importance capitale, lorsqu'il s'agit de tramways urbains établis dans des rues très fréquentées, avec des pentes pouvant atteindre jusqu'à 35 mm. par mètre, et où l'arrêt doit se produire après un très faible parcours, qu'on estime généralement ne pas devoir dépasser la longueur d'une voiture, c'est-à-dire 8 à 10 mètres.

L'arrêt est produit par les freins qui agissent sur les roues des véhicules : ils doivent donc être très puissants. La puissance d'un frein dépend de la résistance que la roue freinée trouve sur le rail de roulement : elle dépend donc du coefficient d'adhérence, qui lui-même dépend de l'état des rails. Or ce coefficient peut varier entre 1/4 du poids porté par l'essieu, lorsque les rails sont très secs, et 1/10 lorsqu'au contraire la voie est humide ; on admet généralement un coefficient de 1/7.

L'expérience a également démontré que le plus grand effort retardateur est obtenu en serrant le sabot du frein contre la roue avec une pression suffisante pour laisser encore tourner cette roue, mais cependant telle qu'en l'augmentant d'une quantité très faible, le calage soit atteint ; il ne faut donc jamais caler les roues lorsque l'on veut obtenir la plus grande puissance d'arrêt possible, et on doit régler en conséquence la pression sur les sabots.

Si nous appelons : P le poids total du ou des véhicules à arrêter (en cas de voitures de remorque) ;

e le parcours avant l'arrêt total ;

v la vitesse en mètres par seconde, au moment de l'application des freins;

$tg\,\alpha$ la pente de la voie,

nous aurons la formule suivante :

$$F = P\left(\frac{v^2}{2ge} + tg\,\alpha\right);$$

qui donnera la force à appliquer par mètre pour obtenir l'arrêt des véhicules.

Prenons l'exemple d'une automotrice de 50 places, pesant 14 t. et marchant à la vitesse de 12 km. à l'heure, soit 3,33 m. à la seconde, sur une pente de 35 mm. par mètre, et devant être arrêtée après un parcours de 7 m.; quelle sera la force retardatrice nécessaire pour obtenir cet arrêt?

Nous aurons :

$$F = 14\,000\left(\frac{\overline{3,33}^2}{2 \times 9,81 \times 7} + 0,035\right) = 1\,624 \text{ kg.}$$

Si nous admettons le coefficient d'adhérence de $\frac{1}{7} = 0,143$, le poids du véhicule qui produira cet effort retardateur sera :

$$1\,624 \times 7 = 11\,368 \text{ kg.}$$

Or l'automotrice pesant 14 t., les deux essieux du véhicule doivent être munis de freins.

Dans le cas où le coefficient d'adhérence tomberait exceptionnellement au $\frac{1}{10}$, le poids devrait être de $1\,624 \times 10 = 16\,240$ kg., et, à moins d'employer du sable, l'arrêt ne pourrait se faire dans un parcours de 7 m., puisque l'automobile avec ses 50 voyageurs ne pèse que 14 t.

Sans l'emploi du sable, l'arrêt se ferait après un parcours de :

$$e = \frac{Pv^2}{2g\,(F - P\,tg\,\alpha)} = \frac{14\,000 \times \overline{3,33}^2}{2 \times 9,81\,(14\,000 \times 0,1 - 14\,000 \times 0,035)};$$

d'où :

$$e = 8^m,69.$$

La différence est faible, mais il est cependant toujours plus prudent, pour ces cas exceptionnels, de munir toutes les automotrices de réservoirs de sable placés à la disposition du mécanicien, qui, en cas de nécessité, peut le lancer sur les rails, en avant des roues.

Il est intéressant de se rendre compte de la pression qui devra être exercée sur les sabots pour obtenir cette puissance retardatrice.

Soit : Q la pression totale sur tous les sabots;

f, le coefficient de frottement des sabots sur les bandages.

D'après les expériences nombreuses faites par Sir Douglas Galton à ce sujet, on sait que ce coefficient de frottement est variable avec la vitesse v du véhicule, et peut être représenté très approximativement par la formule :

$$f_1 = (0,330 - 0,011 \times v).$$

Nous aurons donc, pour le premier cas considéré, c'est-à-dire celui où le coefficient d'adhérence est de 1/7 :

$$Qf_1 = 1\,624 ; \quad Q = \frac{1\,624}{0,330 - 0,011 \times 3,33} = 5\,543 \text{ kg.}$$

La pression à exercer sur chaque sabot, en supposant qu'il y en ait deux par essieu, sera :

$$\frac{5\,543}{4} = 1\,386 \text{ kg.}$$

La timonerie du frein et les appareils moteurs de cette timonerie devront donc être disposés pour obtenir cet effort.

La formule qui représente la valeur de f montre que ce coefficient de frottement augmente à mesure que la vitesse décroît; il y aura donc intérêt à diminuer la pression sur les sabots à mesure du ralentissement de la voiture, afin d'éviter le calage des roues, toujours désavantageux.

Enfin il est utile de ne pas laisser un trop grand jeu entre les sabots et les bandages des roues; ce jeu est généralement limité à 7 ou 8 mm. à l'état neuf, et est suffisant pour empêcher le frottement lorsque les freins sont desserrés. Un jeu plus grand aurait l'inconvénient de retarder l'action des freins dans les cas d'urgence, et de diminuer leur puissance dans le cas des freins à air.

Les différents systèmes de freins employés pour les tramways peuvent se diviser en trois classes :

1° Les freins à main, manœuvrés à l'aide d'une vis et d'un volant;

2° Les freins à air;

3° Les freins électriques.

Freins à main ou à pédale. — Dans ce système, la timonerie qui agit sur les sabots de frein est actionnée au moyen d'une tringle articulée, terminée par une vis actionnée elle-même par un volant (ou une manivelle), placé sur la plate-forme du véhicule, à la disposition du mécanicien; quelquefois ce volant est remplacé par une pédale. Les dimensions de la vis et des bras de levier de la tringle doivent être calculées de manière à obtenir la pression maximum nécessaire sur les sabots, avec un effort sur le volant ne dépassant pas 15 à 20 kg.

La disposition d'ensemble de ce système est variable avec le type de voiture et dépend de l'espace dont on peut disposer au-dessous de la caisse et entre les essieux; il ne peut donc guère exister d'uniformité, et les types sont très nombreux; ils sont d'ailleurs suffisamment connus pour que nous ne nous y arrêtions pas plus longtemps.

Un autre type de frein qui a quelque analogie avec le système précédent, quoiqu'il ne soit pas manœuvré à l'aide d'une vis et d'un volant, et qui a reçu un certain nombre d'applications dans ces dernières années, notamment sur les voitures à vapeur Rowan de la Compagnie générale des Omnibus et sur les tramways électriques de la Madeleine-Courbevoie-Neuilly, est le frein à corde Lemoine; la Compagnie des Omnibus l'emploie du reste, depuis 1882, sur ses voitures de tramways, ainsi que sur ses omnibus à chevaux. Nous allons en donner le principe et le décrire sommairement.

La figure 174 représente le schéma d'une voiture reposant sur deux essieux A et B, freinés chacun par deux sabots C et D. Ces sabots sont fixés à la caisse au moyen de tiges en fer D*a* et C*b*, dont les points d'articulation *a* et *b* sont placés un peu en arrière de la verticale passant par l'axe du sabot, dans le but d'éloigner celui-ci du bandage lorsque les freins sont desserrés; ils sont reliés également avec les boîtes à graisse correspondantes, au moyen

d'une tringle en fer, dans le but de forcer le sabot à rester concentrique à la roue, quel que soit l'abaissement de la caisse sous la charge.

Une tige en fer D*c* relie le sabot D avec l'extrémité d'une corde de forme conique[1], enroulée au moyen de deux spires autour d'un manchon en fer *cd* claveté sur l'essieu; l'autre extrémité de cette corde, qui, après son double enroulement, revient en *c*, est attachée à une petite tringle *ce*, fixée elle-même à une traverse *e* dont l'autre extrémité actionne le sabot de la roue conjuguée de l'essieu B. Cette traverse *e* est à son tour reliée, au moyen d'une tringle *ef*,

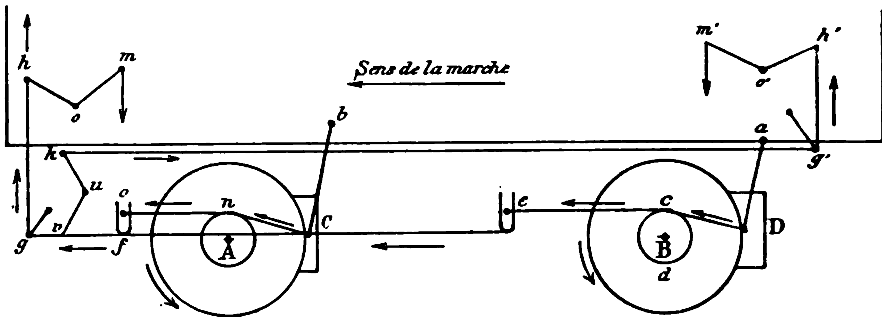


Fig. 174. — Frein Lemoine agissant dans un seul sens.

avec une seconde traverse *f* qui a pour but d'actionner de la même manière les sabots du second essieu A. Enfin, le tout est relié avec la plate-forme de la voiture au moyen de la tringle articulée *f g h*, sur laquelle peut agir le conducteur à l'aide d'une pédale *h o m* pouvant tourner autour d'un point fixe *o*.

Dans le but d'éviter l'usure trop rapide des cordes, on interpose entre elles et le manchon en fer, des cales en bois; le frottement se fait alors sur celles-ci et non sur les cordes.

Lorsque le conducteur n'agit pas sur la pédale, la corde enroulée autour du manchon reste lâche; celui-ci tourne librement et n'entraîne pas la corde dans son mouvement de rotation; à ce moment les sabots sont éloignés des bandages de 8 mm. environ.

Lorsque, au contraire, il appuie en *m* sur la pédale, dans le sens

[1] On donne aux cordes la forme conique, en raison de l'effort croissant qu'elles ont à supporter dans l'enroulement, depuis le point d'attache *c* sur la tringle *c e*, jusqu'à l'autre point d'attache sur la barre *c*D qui supporte le plus grand effort.

indiqué par la flèche, les deux traverses *f* et *e* sont tirées de droite à gauche, les tringles *n o* et *c e* sont tirées dans le même sens, et la corde d'enroulement vient frotter, au moyen des coins en bois, sur le manchon ; par suite de cette friction les deux barres *n*C et *c*D sont tirées dans le sens indiqué par les flèches et serrent les sabots contre les bandages des roues.

Si on cesse d'agir sur la pédale, le mouvement inverse se produit, les freins se desserrent et reprennent leur position normale ; un ressort facilite du reste ce mouvement.

Tel est le fonctionnement du frein Lemoine ; mais, tel que nous venons de le décrire, il a un grave inconvénient : celui de ne pouvoir agir que dans *un seul sens*. Si, en effet, le véhicule, au lieu de suivre la direction indiquée par la flèche, suivait une direction inverse, on voit de suite que les sabots, au lieu d'être amenés en contact avec le bandage, en seraient éloignés. Or aujourd'hui, un certain nombre de véhicules de tramways ont double plate-forme et doivent pouvoir circuler dans les deux sens ; il faut donc disposer le frein Lemoine pour remplir ces conditions.

Dans ce but, on adopte la disposition indiquée sur la figure 175.

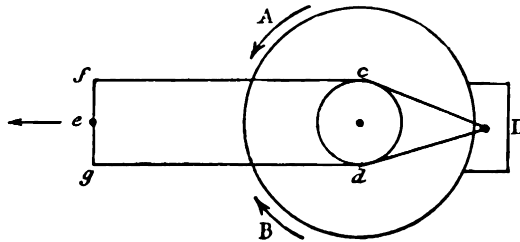


Fig. 175. — Frein Lemoine agissant dans les deux sens.

Au lieu d'une seule corde, on enroule deux cordes en sens inverse sur le manchon, en reliant leurs extrémités, d'un côté aux barres *c* D et *d* D agissant sur les sabots, et de l'autre aux tringles *fc* et *dg* reliées aux extrémités d'une tige *fg* fixée sur la traverse *e*, dont nous avons parlé dans la première disposition.

Lorsque la traverse *e* sera tirée dans le sens indiqué par la flèche, si la roue tourne dans le sens A, ce seront les tiges *fc* et *c* D

qui agiront sur le sabot; si, au contraire, la roue tourne dans le sens B, ce seront les tiges *g d* et *d* D qui serreront les freins.

Les traverses devant suivre la même direction dans les deux sens de la marche, on dispose la pédale et le renvoi de mouvement de la seconde plate-forme comme il est indiqué dans la figure 174 en *m'o'h'g'k u v*.

Quels seront les efforts qu'auront à supporter les barres *c*D et les tringles *e c* pour un effort retardateur donné et qu'on peut calculer, suivant les circonstances, d'après les formules que nous avons données précédemment et que nous représenterons par F.

Les résistances offertes par le frein de chaque roue du véhicule se composent :

1 De la pression du sabot sur le bandage, qui peut être représentée par Tf', en appelant T la tension de la barre *c*D et f' le coefficient de frottement du sabot sur le bandage ;

2° De la tension de la corde sur le manchon, qui, rapportée au bandage, peut se représenter par :

$$T \frac{R}{r} ;$$

où : $r =$ rayon du manchon, plus la demi-épaisseur de la corde ;
$R =$ le rayon de la roue du véhicule.

La somme de ces deux résistances doit être égale à F. Nous aurons donc :

$$T \left(\frac{r}{R} + f'\right) = F = Pf;$$

dans le cas où tout le poids de la voiture est utilisé pour l'arrêt, f étant le coefficient d'adhérence.

D'où :

$$T = \frac{F}{\left(\frac{r}{R} + f'\right)} = \frac{Pf}{\left(\frac{r}{R} + f'\right)}.$$

Nous aurons donc ainsi la tension de chacune des barres *c* D, *n* C, reliant la corde avec le sabot.

Pour obtenir la tension de la tringle *c e*, reliant l'autre extrémité de la corde avec la traverse, il suffira de prendre la formule qui

relie les tensions du brin mené et du brin menant, dans le cas d'une corde enroulée sur une poulie.

Soit : p la tension dans le brin ce ;

T celle dans la barre cD ;

e la base des logarithmes népériens = 2 718 ;

α la longueur d'arc de rayon 1 embrassé par la corde (dans le cas actuel, la corde faisant deux enroulements, nous aurons $\alpha = 4\pi$) ;

f' le coefficient de frottement de la corde, ou plutôt des coins en bois sur le manchon en fer, que nous pourrons admettre de 0,35 [1].

Nous aurons :

$$p = \frac{T}{e^{\alpha f'}}.$$

Reprenons le cas, que nous avons pris plus haut, d'une automotrice de 50 places pesant 14 t., descendant une pente de 35 mm. par mètre avec une vitesse de 12 km. à l'heure, soit 3,33 m. par seconde, et qui doit être arrêtée après un parcours de 7 m. avec un coefficient d'adhérence de $\frac{1}{7}$.

Nous avons trouvé que, dans ce cas, la valeur de F est de 1 624 kg., soit par roue de : $\frac{1\,624}{4} = 406$ kg. Le rayon du manchon, plus le demi-diamètre de la corde, est de 0,0714 m. ; le rayon de la roue, de 0,50 m. Le coefficient de frottement du sabot sur le bandage avec une vitesse de 3,33 m. est de : $(0,330 - 0,011 \times 3,33) = 0,293$; nous aurons donc :

$$T = \frac{406}{\frac{0,0714}{0,50} + 0,293} = 931 \text{ kg.};$$

qui sera l'effort qu'aura à supporter chacune des barres c D reliant la corde au sabot.

Quant à l'effort p dans chacune des tringles ec, on, il sera

$$p = \frac{931}{2\,718^{4 \times 3,14 \times 0,35}} = 11,51 \text{ kg.}$$

[1] Les cordes doivent être en chanvre de première qualité et bien goudronnées, afin de les rendre moins hygrométriques et dans le but également d'en augmenter l'adhérence. La durée moyenne des cordes est d'environ 20 000 kilomètres parcourus.

L'effort de traction sur la tringle *fe* sera évidemment double et égal à : $11,52 \times 2 = 23,02$ kg., et enfin celui sur la tringle articulée *f g h* qui arrive à la pédale, sera :

$$23,02 \times 2 = 46,04 \text{ kg.}$$

Les dimensions des bras de levier de la pédale devront être calculées en prenant ce chiffre comme base, mais de manière à réduire la pression en *m*, à produire par le conducteur, à une valeur de quelques kilogrammes.

Avant de passer à l'étude du second système de frein, nous devons dire un mot du frein à patin, en usage sur le tramway funiculaire de Belleville.

Cet appareil, représenté par la figure 176, se compose d'un arbre horizontal A, placé longitudinalement sous la caisse de la

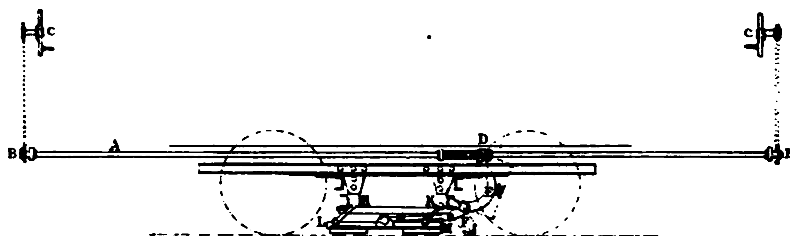


Fig. 176. — Frein à patin du funiculaire de Belleville.

voiture et régnant d'une extrémité à l'autre. A chacun de ses bouts il porte une petite roue dentée B actionnée par une chaîne de Galle placée sur la plate-forme ; cette chaîne, droite à une extrémité, croisée à l'autre, est commandée par un volant à axe horizontal placé à portée du mécanicien. Par suite de cette disposition des chaînes, l'arbre tourne toujours dans le même sens, quel que soit le volant sur lequel on agit.

L'arbre horizontal est muni vers son milieu d'une partie filetée sur laquelle se meut un écrou D ; à cet écrou est articulé un levier E coudé, tournant autour d'un axe fixe F et commandant, par son extrémité inférieure, une tige G fixée au milieu de la branche inférieure d'un parallélogramme articulé, dont les sommets supérieurs H et K sont fixes. Les sommets inférieurs L et M

portent des patins en fonte de 0,10 m. de largeur et de 0,25 m. de longueur.

Lorsqu'on fait tourner l'un ou l'autre des volants de gauche à droite, l'écrou D s'avance vers la gauche ; le levier E tourne autour de l'axe F et entraîne vers la droite le point G et avec lui le côté LM du parallélogramme articulé. Les patins viennent alors au contact des rails et exercent une pression croissante en soulevant la voiture, jusqu'à ce que les roues cessent de toucher les rails ; tout le poids de la voiture agit ainsi sur les patins.

Freins à air. — L'application aux voitures de tramways à traction mécanique, des freins à air comprimé, soit directs, soit automatiques, est déjà assez ancienne ; on avait été amené à les adopter, en raison des bons résultats obtenus par leur emploi dans les compagnies de chemins de fer. Mais l'expérience a fait reconnaître que, lorsqu'il s'agit d'automotrices faisant de la remorque, le frein direct ne convenait plus, parce qu'il n'assurait pas l'arrêt des deux tronçons, en cas de rupture d'attelage ; il ne donne pas non plus au conducteur de la voiture remorquée la possibilité d'obtenir l'arrêt du train, en cas de danger de cette voiture. Ce sont du reste les mêmes raisons qui ont fait abandonner le frein direct par les ingénieurs de chemins de fer et ont fait admettre le frein automatique.

D'un autre côté, lorsqu'il s'agit d'automotrices avec remorque, ou de plusieurs voitures traînées par une locomotive, comme c'est le cas sur la ligne de Louvre-Sèvres-Versailles, le frein automatique devient, dans certains cas, d'une application assez difficile, par suite de la succession très rapide des arrêts ou des ralentissements ; on appauvrit ainsi rapidement l'approvisionnement d'air des réservoirs et on rencontre certaines difficultés, au point de vue de la production normale de l'air nécessaire à des arrêts si fréquemment répétés.

La Compagnie générale des Omnibus, à la suite de longues expériences, a été amenée à adopter une solution intermédiaire qui consiste à avoir, quand on le désire, le freinage direct de la locomotive ou de l'automotrice seule, tout en conservant, en cas de besoin, le freinage automatique sur tout le train, y compris la

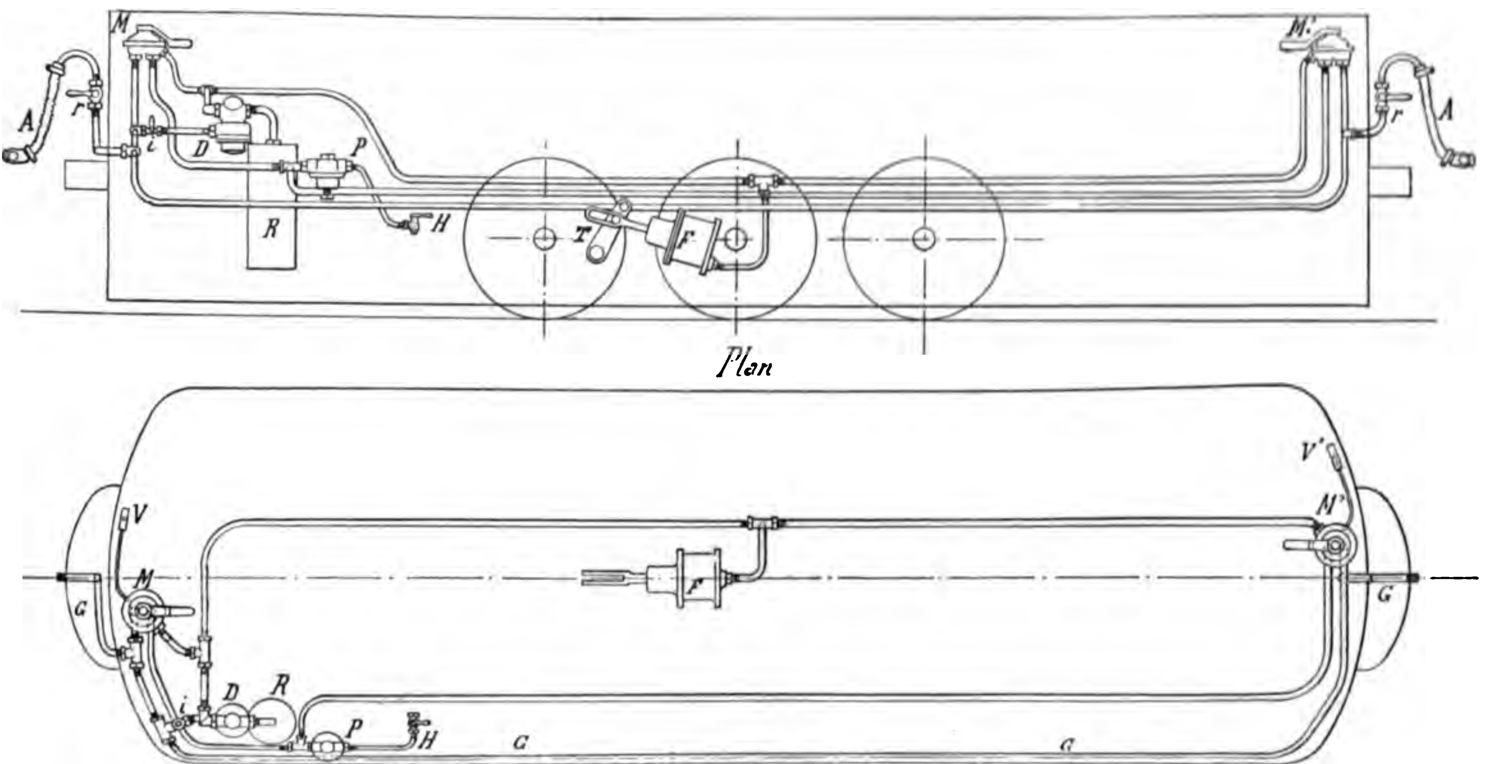


Fig. 177. — Ensemble des appareils de frein sur une locomotive à air comprimé.

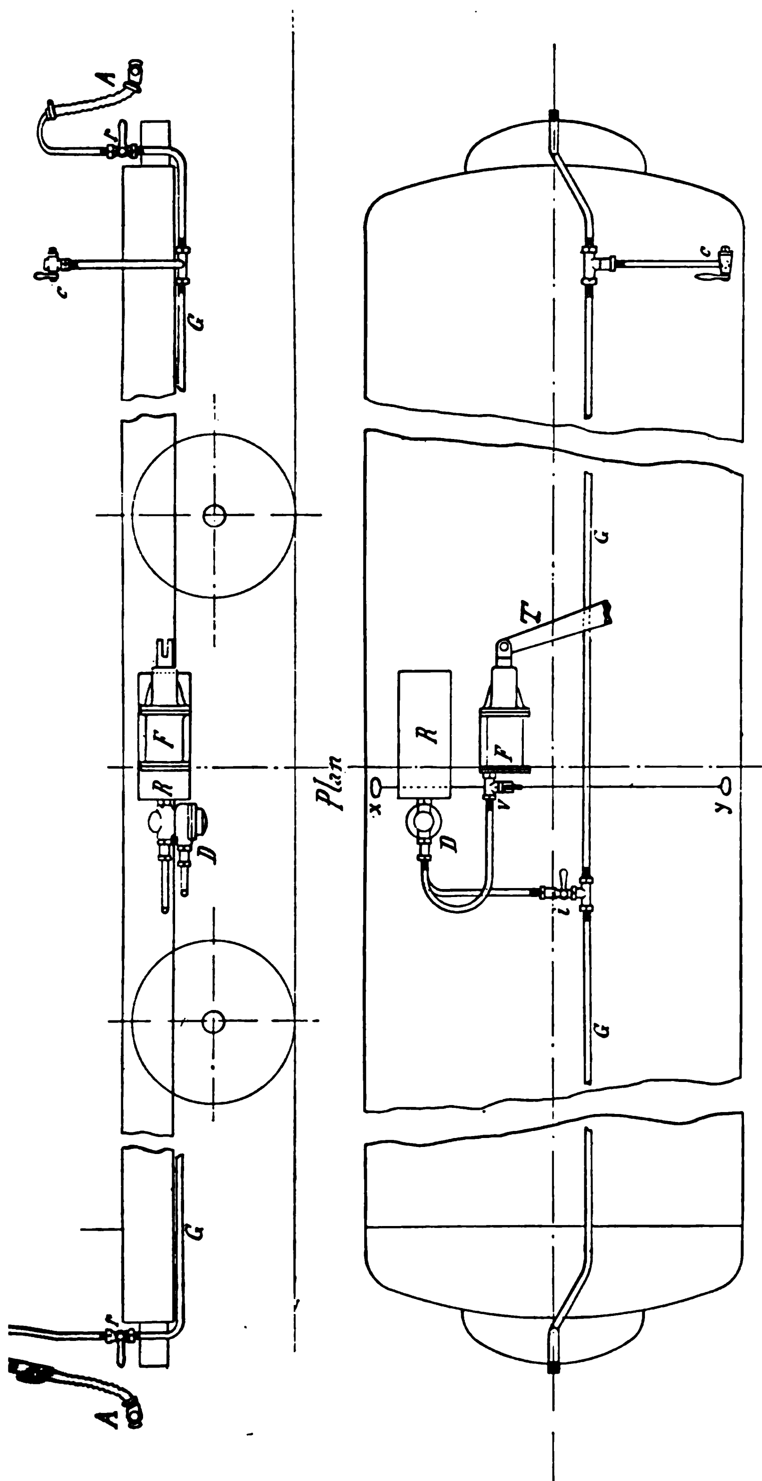


Fig. 178. — Ensemble des appareils de frein d'une voiture de remorque.

locomotive ou l'automotrice. Cette solution est obtenue au moyen du frein à air comprimé, système Soulerin, en modifiant légèrement le robinet de manœuvre et le distributeur de l'automotrice, et par l'addition d'une tuyauterie supplémentaire, reliant le robinet de manœuvre au cylindre à frein. C'est cette nouvelle disposition, appliquée par la Compagnie générale des Omnibus à son matériel Mékarski, ainsi qu'à ses automotrices Serpollet, que nous allons décrire.

La figure 177 montre l'ensemble des appareils sur une des locomotives Mékarski, commandés, comme on le sait, de chacune des plates-formes. M et M' sont les robinets de manœuvre, D le distributeur, P le détendeur, R le réservoir auxiliaire, F le cylindre à frein.

Le fonctionnement est le suivant :

Pendant la marche du train, l'air comprimé à 80 kg. des réservoirs arrivant par H, passe dans le détendeur P où sa pression tombe à 5 kg. Ce détendeur est représenté figure 180 et se comprend de lui-même ; l'arrivée de l'air à 80 kg. se fait par U, l'air détendu sort par M, et la soupape S est une simple soupape de sûreté, en cas d'avarie.

L'air détendu arrive au robinet de manœuvre, et peut passer de là, suivant la position de la poignée, soit directement au cylindre à freins (frein direct de la machine), soit dans le réservoir auxiliaire R par l'intermédiaire du distributeur D, et par conséquent en même temps, par la conduite générale, dans tous les réservoirs auxiliaires des voitures de remorque.

Une voiture de remorque est représentée figure 178 ; le robinet *c* permet la vidange de l'air de la conduite pour freiner automatiquement le train, en cas d'accident à cette voiture.

Le robinet de manœuvre, représenté figure 179, comporte cinq positions :

La position I, la plus à gauche, est celle du desserrage à fond du frein automatique aussi bien que du frein direct.

La position V, la plus à droite, est celle du serrage à fond du frein automatique, et par conséquent de tout le train.

La position II est celle de repos, après un serrage modéré du

frein direct. Elle permet en même temps l'alimentation de la conduite du frein automatique.

La position III est la position du serrage à fond du frein direct.

La position IV est celle de repos après serrage modéré du frein automatique.

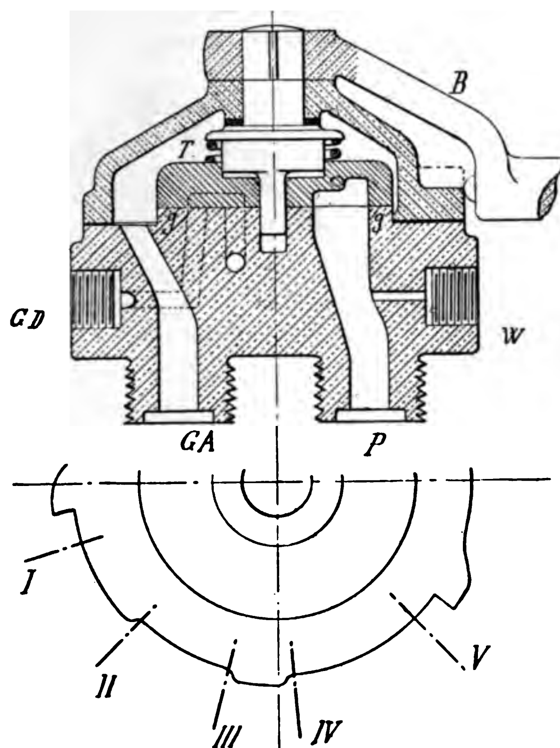


Fig. 179. — Robinet de manœuvre.

Les positions I, III et V, que nous venons d'indiquer, sont celles auxquelles il faut maintenir pendant quelque temps (trois à quatre secondes) le robinet de manœuvre pour opérer le serrage ou le desserrage à fond.

Si, au contraire, le mécanicien veut seulement modérer sa vitesse au frein direct, dans une pente ou dans une traversée de rue, il lui suffira de laisser un instant seulement le robinet à la position III et de le ramener à la position II ; chaque fois qu'il fera cette manœuvre, il augmentera la pression dans le cylindre à

freins de la machine seule, et passera par conséquent par tous les degrés d'effort jusqu'au maximum.

Inversement, si, après un ralentissement trop fort, il veut augmenter sa vitesse, il placera, un instant seulement, le robinet à la position I et le ramènera à la position II ; chaque fois qu'il fera cette manœuvre, il laissera échapper de l'air du cylindre à freins de la machine jusqu'au desserrage maximum.

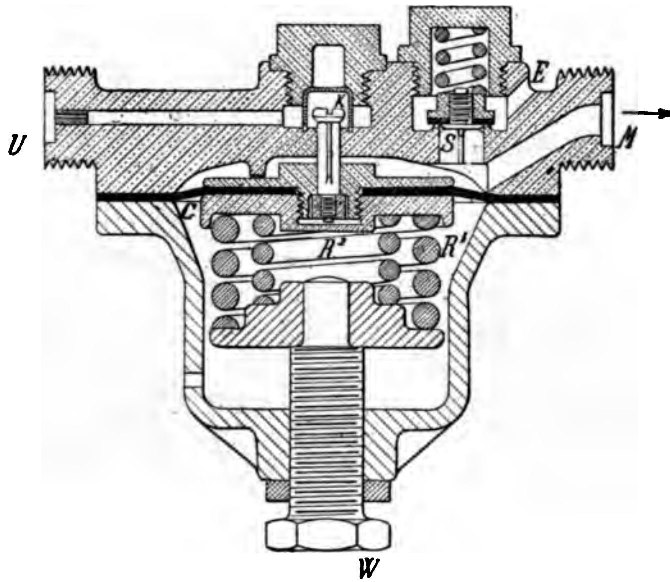


Fig. 180. — Détendeur.

La plupart du temps, il lui suffira, pour régler l'allure de l'ensemble du train, de se servir ainsi du frein direct, c'est-à-dire d'agir sur la machine seule; mais dans le cas de longs trains, il peut également être bon de modérer avec le frein automatique, c'est-à-dire en agissant sur tout le train. Il lui suffit pour cela d'amener un instant le robinet à la position V, et de le ramener vivement à la position IV. En répétant cette manœuvre, il aura également plusieurs augmentations successives de pression sur tout son train, jusqu'à ce qu'il arrive au serrage à fond. Mais il ne peut desserrer que *complètement*, la modérabilité au desserrage n'existant pas avec les freins automatiques. Dans ce cas, il doit alors ramener le robinet à la position I.

Enfin, dans le cas où le mécanicien, après avoir fait un ralentissement au frein direct, se voit obligé de faire un serrage d'urgence, il n'a qu'à pousser son robinet à la position V, et le frein automatique agit immédiatement et avec toute son énergie sur tout le train, y compris la machine.

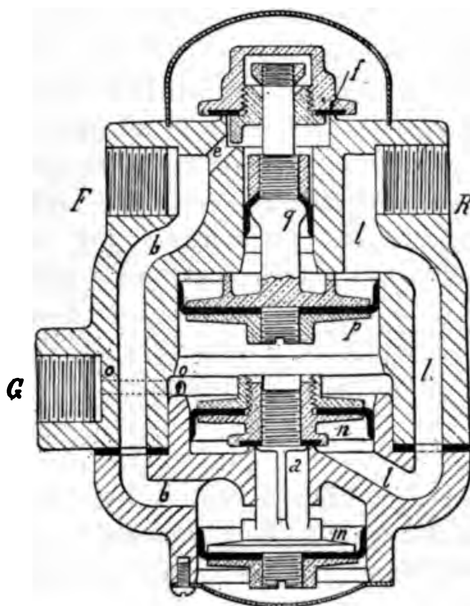


Fig. 181. — Distributeur.

Le distributeur est représenté figure 181. Son fonctionnement est le suivant :

G communique avec la conduite générale; F, avec le cylindre à freins ; R, avec le réservoir auxiliaire.

En marche normale, l'air comprimé de la conduite générale entre par le canal *o o*, passe autour des cuirs *p* et *n*, et se rend par *l l* au réservoir auxiliaire. Pendant ce temps, le système mobile supérieur *p q f* est soulevé, et par conséquent le cylindre à freins communique avec l'extérieur par *e*.

Au contraire, le système inférieur *m a n* est abaissé et le clapet *a* fermé.

Pour opérer un freinage, on fait une dépression dans la conduite générale, dépression qui se transmet dans l'espace compris

entre les cuirs *p* et *n*; aussitôt le système *p q f* s'abaisse, et le clapet *f* est fermé; le système *m a n* au contraire se soulève, et le clapet *a* s'ouvre. L'air du réservoir auxiliaire passe alors par *l a* et *b* dans le cylindre à freins.

Toutefois, la quantité d'air qui passe est proportionnelle à la dépression produite dans la conduite, car le système *m a n* est un système équilibré qui se referme dès qu'il est passé la quantité d'air voulue du réservoir auxiliaire au cylindre à freins; l'appareil est donc entièrement modérable et de plus automatique, puisque toute ouverture de la conduite générale, par un robinet quelconque, donne immédiatement le serrage à fond.

Le distributeur de machine subit comme seule modification la fermeture du conduit *e* qui fait communiquer le cylindre à freins avec l'extérieur par le clapet *f*. Dès lors, le desserrage de la machine se produit non plus par ce clapet *f*, mais, grâce à la conduite supplémentaire que nous avons indiquée, par le robinet de manœuvre.

Quant au serrage direct, il se produit par une introduction directe de l'air dans le cylindre à freins, cet air n'ayant aucune action sur le distributeur, puisqu'il trouve le clapet *a* fermé, et que son action sur le cuir *m* ne peut tendre qu'à augmenter sa fermeture.

En pratique, chaque fois qu'il s'agit de descendre une pente ou de faire des ralentissements devant un obstacle, il suffit au mécanicien de mettre dans le cylindre à freins de la machine, une petite quantité d'air pour opérer le ralentissement de l'ensemble du train. Si l'obstacle persiste, ou si un arrêt d'urgence s'impose, il lui suffit de pousser la poignée à la position V pour avoir immédiatement le freinage automatique d'urgence sur le train entier.

L'avantage du frein direct est qu'il est essentiellement modérable, tandis que, dans un frein automatique, l'intensité du serrage est toujours fonction de la perte d'air dans la conduite générale. Quant au desserrage, il n'y est jamais modérable, et si l'on a besoin d'abaisser la pression au cylindre, on n'a d'autre ressource que de desserrer complètement.

L'application aux automotrices Serpollet est la même, au point de vue des appareils en général; mais comme il n'y a qu'une

seule plate-forme, un des robinets de manœuvre a disparu, ainsi qu'une grande partie de la tuyauterie. Le détendeur a également disparu, puisqu'il faut, dans ce cas, comprimer l'air sur l'automotrice. Cette production d'air comprimé a lieu, soit par un petit cheval-vapeur indépendant, qui a, paraît-il, donné de bons résultats aux essais, soit à l'aide d'une pompe actionnée par un excentrique calé sur l'essieu. Cette solution a été adoptée comme plus simple par la Compagnie des Omnibus ; elle a pour avantage d'être moins coûteuse et de donner lieu à un entretien moindre. Elle offre toutefois certains inconvénients, entre autres le manque d'air au départ et la relation intime entre l'essieu et le compresseur ; une expérience prolongée seule pourra décider à laquelle de ces deux solutions on devra s'arrêter.

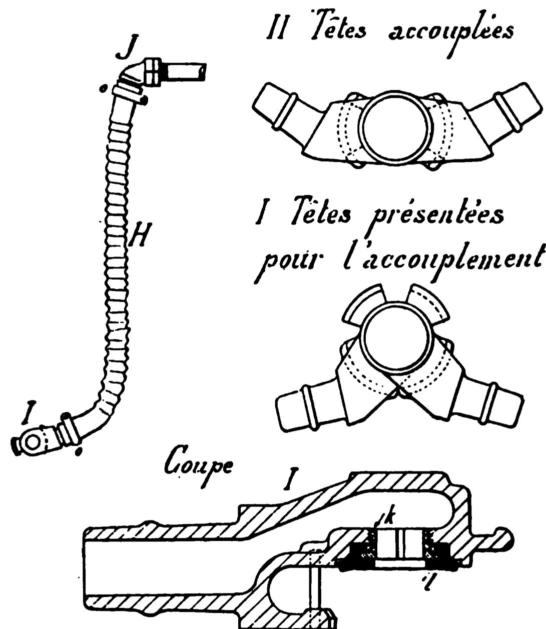


Fig. 182. — Accouplement.

La figure 182 montre la disposition des accouplements entre l'automotrice et la où les voitures de remorque.

Freins électriques. — Les voitures automotrices à traction

électrique sont presque toujours munies, soit du frein à vis manœuvré à la main, soit du frein à corde Lemoine, soit des deux systèmes.

Les arrêts ordinaires se font généralement avec l'un de ces deux freins; mais on peut cependant se servir des moteurs électriques comme frein et obtenir ainsi des arrêts très rapides, auxquels on peut recourir en cas d'urgence.

Les dynamos installées sur une automotrice sont des machines motrices donnant l'impulsion à la voiture, tant que ces dynamos reçoivent un courant venant, soit de l'usine centrale par le fil aérien ou souterrain, soit des accumulateurs. Mais si, à un moment donné, on vient à couper ce courant, l'appareil moteur, étant donnée la vitesse de rotation acquise, cesse d'être une dynamo réceptrice et devient génératrice; elle produira donc, à son tour, un courant et une force électromotrice comme une dynamo génératrice ordinaire; une résistance sera créée entre l'induit et l'inducteur. Si maintenant ce courant produit est amené à traverser un rhéostat, dont on modifie successivement la résistance, la vitesse de la dynamo ira en diminuant, ainsi que celle de la voiture, jusqu'à l'arrêt.

On obtient par ce procédé des arrêts très rapides, mais on peut en obtenir de plus rapides encore, lorsque les voitures sont munies de deux appareils moteurs. Il suffit, après avoir coupé le courant, de les mettre en court-circuit, l'un sur l'autre. Dans ce cas, chaque dynamo devient, comme dans le cas précédent, génératrice, et envoie le courant produit dans la seconde qui tendra alors à prendre un mouvement inverse de la première. L'arrêt sera très énergique et très brusque; aussi est-ce pour cela qu'il ne faut user de ce moyen qu'en cas de danger.

Le freinage électrique, aussi bien que celui obtenu par le frein à vis ou le frein Lemoine, s'applique bien aux automotrices voyageant seules; mais lorsqu'elles sont appelées à remorquer une ou deux voitures d'attelage, ces freins deviennent insuffisants, puisqu'ils sont inefficaces en cas de rupture d'attelage, et que les conducteurs des voitures de remorque ne peuvent actionner le frein en cas d'accident. Il faut alors avoir recours aux freins automatiques dans le genre du frein à air dont nous avons parlé précédemment, ou à des systèmes similaires.

COMPARAISON

ENTRE LES

DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TRACTION MÉCANIQUE

AVANTAGES, INCONVÉNIENTS

Nous résumons dans le tableau suivant les dépenses totales de traction par kilomètre-voiture, en y comprenant l'amortissement.

Dépenses totales de traction par kilomètre-voiture.

	Frais de traction.	Amortissement.	Dépense totale.
Système Rowan	0,35	0,11	0,46
— Serpollet	0,30	0,11	0,41
Moteur à gaz.	0,43	0,11	0,54
Air comprimé.	0,42	0,15	0,57
Accumulateurs	0,34	0,13	0,47 [1]
Trolley	0,31	0,17	0,48

Nous avons pris dans ce tableau, comme systèmes de traction mécanique, ceux qui semblent les mieux appropriés à un service de tramways dans une grande ville, Paris par exemple; les prix ont donc été établis dans ces conditions. Nous avons omis le système de traction Lamm et Francq, qui, jusqu'ici du moins, est basé sur l'emploi d'une locomotive remorquant un certain nombre de voitures, et qui paraît par cela même trouver son application plus spéciale sur les lignes suburbaines ou les réseaux de chemins de fer secondaires.

La traction funiculaire a été également écartée, parce qu'elle ne s'applique qu'à des cas spéciaux : intensité de trafic très grande, jointe à de très fortes rampes.

Comme base d'établissement de la dépense de traction, nous avons pris une résistance moyenne par tonne de 17,5 kg.; nous avons cru devoir prendre ce chiffre, quoiqu'il dépasse celui de

[1] Voir pages 182, 183 et 193.

beaucoup de lignes de tramways, parce qu'il est égal et même inférieur à celui d'un certain nombre de lignes importantes, dans Paris, telles que la ligne de Saint-Augustin-Cours de Vincennes, Place de la République à Romainville, etc... Il est du reste facile d'établir la dépense exacte propre à une ligne déterminée, en connaissant la résistance moyenne vraie de la ligne en question.

Dans ces conditions, les chiffres de dépense que nous donnons peuvent être considérés comme des *maxima*. Ils permettront toutefois de faire la *comparaison*, au point de vue des frais de traction, entre les différents systèmes, puisque tous les chiffres sont établis sur une même résistance moyenne de 17,5 kg.

Les frais d'amortissement, comptés à 10 p. 100 [1], sont basés sur les dépenses de premier établissement, spécialement affectées à la traction, telles que les appareils nécessaires pour la production de la force motrice et son emploi, les bâtiments des machines, dépôts et accessoires. Ils s'appliquent à un réseau de 30 kilomètres de développement, comprenant 20 voitures en service et 10 en réserve, ce qui correspond à un parcours annuel en chiffres ronds de 1 000 000 de kilomètres, en admettant un parcours journalier de 150 km. par voiture.

Le système le plus économique paraît donc être le moteur à vapeur Rowan ou Serpollet; viennent ensuite, et avec une faible différence, la traction électrique par accumulateurs et la traction électrique par trolley.

Dans ce dernier système, la dépense réelle de traction, c'est-à-dire sans amortissement, est inférieure à celle des voitures Rowan et presque égale à celle des voitures Serpollet ; son infériorité, relativement à ces deux derniers systèmes, est due seulement aux frais d'amortissement assez élevés, provenant des dépenses d'établissement des conducteurs aériens.

Le système le plus cher est le système de traction par l'air comprimé.

Cette comparaison est faite au point de vue des dépenses, mais il y a lieu aussi de comparer les différents systèmes au point de vue des avantages et des inconvénients résultant de leur emploi; nous allons essayer de les résumer en quelques lignes.

[1] Voir page 15.

Les systèmes Rowan et Serpollet ont l'avantage de l'indépendance complète de la voiture, qui ne dépend ni d'une usine centrale, ni, en marche, d'une alimentation de force motrice par conducteurs. La voiture Serpollet paraît supérieure à la voiture Rowan, à cause de la plus grande élasticité de sa chaudière, ce qui permet de faire varier rapidement la puissance motrice par une plus grande injection d'eau dans les tubes. Toutefois il y a lieu d'attendre une plus longue durée d'exploitation, afin de savoir si l'entretien de ce type de chaudière ne sera pas la cause d'un accroissement de dépenses. La chaîne qui transmet la force motrice aux essieux nécessite également un certain soin, et on peut se demander si une transmission directe ne serait pas plus avantageuse; quelques essais ont été faits, du reste dans ce sens. Enfin, les pompes d'amorçage et d'injection d'eau dans la chaudière ont besoin d'une grande surveillance.

Ces deux systèmes ont l'un et l'autre l'inconvénient d'avoir la chaudière placée contre le compartiment réservé aux voyageurs, et de pouvoir ainsi les incommoder, soit par les gaz et l'air chaud, soit par la vapeur d'échappement venant des cylindres.

Les voitures Rowan et Serpollet sont en service à Paris; mais c'est la voiture Serpollet qui a pris dans ces derniers temps le plus d'extension. La Compagnie générale des Omnibus vient de s'en faire livrer soixante, tout dernièrement.

Nous devons faire remarquer qu'au point de vue du travail du conducteur-mécanicien, celui-ci est moindre avec les systèmes électriques qu'avec ceux à vapeur Rowan ou Serpollet, puisque dans ce cas le conducteur a en plus à s'occuper de la surveillance d'une chaudière, et en outre, dans le système Serpollet, de la pompe d'amorçage à chaque arrêt. Il faut donc des agents plus entraînés que pour les systèmes électriques.

La voiture automotrice avec moteur à gaz a l'avantage de pouvoir être alimentée facilement aux différents points du réseau, puisque la force motrice est produite par le gaz d'éclairage, qu'on peut recueillir en chaque point de la ville et emmagasiner dans des réservoirs à la pression voulue, sans aucune difficulté. Ce système jouit donc, comme les deux premiers, d'une indépendance relative.

Mais, comme nous l'avons expliqué en parlant plus spécialement

de ce système, le moteur à gaz entraîne de grandes complications mécaniques, soit pour obtenir les variations de vitesse, soit pour le changement de marche. De plus, il est assez encombrant, surtout à cause du volant, qui doit avoir un certain poids pour maintenir la régularité de la marche. Le moteur à gaz produit également dans la voiture des trépidations souvent désagréables et difficiles à éviter ; enfin, les émanations des gaz de combustion pénètrent dans la voiture et viennent incommoder les voyageurs.

Malgré les différentes améliorations apportées à ce système dans ces dernières années, en Allemagne et en Angleterre, principalement par la *Gaz Traction C°*, il reste évidemment beaucoup à faire pour rendre ce système complètement pratique.

Le système de traction électrique par accumulateurs donne aux voitures, comme dans le système précédent, une indépendance relative, puisque la force motrice ne dépend que d'une usine centrale et que le rechargement, soit complet, soit partiel, des accumulateurs, peut se faire soit à l'usine, comme aux tramways de Saint-Denis, soit en un point quelconque de la ligne, comme aux tramways de Neuilly-Courbevoie.

Il permet de maintenir celles-ci très propres, et, avec la nouvelle disposition adoptée pour les tramways de St-Denis-Madeleine-Opéra, aucune émanation désagréable ne peut pénétrer dans la voiture.

Il a l'inconvénient d'augmenter le poids mort des voitures, et par suite le poids à transporter, si on le compare au système part trolley, et jusqu'ici les frais d'entretien et de manipulation des accumulateurs sont restés assez élevés. De plus, les forts débits sont préjudiciables, et, à moins d'augmenter considérablement le poids des accumulateurs, l'élasticité de ce système se trouve par cela même limitée.

De grandes modifications, marquant un progrès réel, ont été apportées tout dernièrement, comme nous l'avons dit, aux accumulateurs ainsi qu'à leur mode de chargement (Madeleine-Opéra-Saint-Denis; Madeleine-Neuilly-Courbevoie), et il y a lieu de penser que ces améliorations amèneront une diminution dans les frais de traction; toutefois, avant de conclure en faveur de ce système, il y a lieu d'attendre que le temps ait permis d'obtenir des résultats certains, soit au point de vue du rendement, soit au point de

vue des dépenses. Ce système de traction présente de grands avantages dans les villes où les administrations municipales, par suite de questions d'esthétique, sont opposées à l'emploi du conducteur aérien avec trolley. Ainsi, dans un réseau mi-urbain et mi-suburbain, on pourrait appliquer les accumulateurs dans la ville, et le conducteur avec trolley en dehors de la ville [1].

La traction par l'air comprimé offre les mêmes avantages que le système précédent, quant à l'indépendance relative; toutefois, le poids mort supplémentaire à transporter et résultant des appareils moteurs, réservoirs contenant l'air comprimé et appareils réchauffeurs avec accessoires, est supérieur à celui dû aux accumulateurs électriques; les voitures sont par conséquent plus lourdes.

Quant aux machines nécessaires pour la production de l'air comprimé, pour son emmagasinage et sa distribution aux voitures, elles sont plus compliquées et plus coûteuses que celles nécessaires pour le chargement des accumulateurs.

D'un autre côté, ce système donne une grande élasticité et permet de remonter facilement les rampes, avec remorque, comme on le voit sur la ligne de Saint-Augustin-Cours de Vincennes. Les voitures peuvent être maintenues très propres et les voyageurs n'ont à craindre aucune odeur désagréable venant des appareils moteurs.

Le système de traction électrique par trolley ne donne plus aux voitures l'indépendance dont nous avons parlé à propos des systèmes précédents; celles-ci dépendent en effet d'une usine centrale et d'un conducteur aérien, sur lequel se fait la prise de courant; de plus, il nécessite le remaniement des voies existantes, lorsque le retour du courant se fait par les rails.

Le conducteur aérien est souvent un obstacle à l'emploi de ce système dans certaines villes, ou dans certains quartiers, où il faut tenir compte de l'effet disgracieux qu'il peut produire.

Le retour du courant par les rails, comme on a l'habitude de le faire aujourd'hui, peut être la cause d'effets électrolytiques préjudiciables aux tuyaux de conduite d'eau ou de gaz placés sous la chaussée.

Il est juste de dire que ces inconvénients peuvent être très atténués en maintenant un faible potentiel dans la conduite de retour,

[1] Voir la note page 139.

et en donnant une grande conductibilité aux rails par un bon éclissage électrique et une section suffisante.

Dans ce système, les voitures peuvent être légères, puisque tout se réduit au poids des dynamos motrices. Elles peuvent également être maintenues très propres et aucune émanation désagréable ne peut venir gêner les voyageurs.

Le conducteur aérien, qui relie directement la voiture avec l'usine centrale, donne une grande élasticité au système et permet de franchir sans difficulté les fortes rampes, avec remorque.

Dans les cas exceptionnels où la pose des conducteurs aériens est impossible, on peut, au prix d'une assez forte dépense supplémentaire, il est vrai, avoir recours aux conducteurs souterrains placés dans un caniveau. C'est ce qui a été fait dans plusieurs grandes villes, notamment à Budapest et à Washington aux États-Unis, et c'est ce qui a été proposé pour Paris à plusieurs reprises. Avec cette disposition, les fils aériens sont maintenus pour les parties suburbaines du réseau, ainsi que pour les quartiers où les questions d'esthétique ont moins d'importance. Nous devons ajouter cependant qu'il y aurait peut-être lieu, dans ce cas, de comparer les dépenses résultant de l'application de ce système mixte, avec celles résultant de l'emploi du système par trolley avec accumulateurs, dont nous avons dit un mot tout à l'heure.

Nous venons de résumer succinctement les avantages et les inconvénients des différents systèmes principaux de traction mécanique. Il serait bien difficile, si ce n'est même téméraire, de tirer actuellement une conclusion ferme, et de dire que tel système est le meilleur et supérieur à tel autre ou à tous les autres. Tout au contraire, on serait même amené à dire que les avantages et les inconvénients se contre-balancent, et qu'en résumé le choix à faire est une question d'espèce, dépendant surtout des circonstances locales dans lesquelles on se trouve.

On peut dire cependant que si quelques lignes de tramways ont été exploitées dans ces dernières années, et principalement en France, au moyen des moteurs à vapeur ou de l'air comprimé, c'est la traction électrique qui a pris le plus grand développement, et surtout le système par trolley, ainsi que le montre le tableau ci-dessous qui nous servira de conclusion [1].

[1] Tableau extrait de l'*Industrie électrique*, numéro du 10 mars 1897.

LIGNES EN SERVICE AU 1er JANVIER 1897

ÉTATS	LONGUEUR TOTALE de lignes en kilomètres.	PUISSANCE TOTALE en kilowatts.	NOMBRE TOTAL de voitures automotrices.
Allemagne	642,69	18 963	1 631
Belgique	34,90	1 220	73
Angleterre	109,42	4 670	168
Bosnie	5,60	75	6
Autriche-Hongrie	83,89	2 389	194
Espagne	47,00	600	40
France	279,36	8 736	432
Hollande	3,20	320	14
Irlande	18,00	486	32
Italie	115,67	5 970	289
Suède et Norvège	7,50	225	15
Portugal	2,80	110	3
Roumanie	5,50	140	15
Russie	14,75	870	48
Serbie	10,00	200	11
Suisse	78,75	2 622	129
TOTAUX	1 459,03	47 596	3 100

NOMBRE ET NATURE DES LIGNES EN SERVICE AU 1er JANVIER 1897

ÉTATS	LIGNES à conducteur aérien.	LIGNES à conducteur souterrain.	LIGNES à rail central.	LIGNES à accumulateur	TOTAL des lignes.
Allemagne	45	2	»	4	51
Angleterre	10	1	6	1	18
Autriche-Hongrie	7	2	»	1	10
Belgique	4	1	»	»	5
Bosnie	1	»	»	»	1
Espagne	3	»	»	»	3
France	19	1	1	5	26
Hollande	»	»	»	1	1
Irlande	1	»	1	»	2
Italie	9	»	»	»	9
Suède et Norvège	1	»	»	»	1
Portugal	1	»	»	»	1
Roumanie	1	»	»	»	1
Russie	2	1	»	»	3
Serbie	1	»	»	»	1
Suisse	17	»	»	»	17
TOTAUX	122	8	8	12	1 0

D'après le *Street Railway Journal* du 31 mai 1896, l'Amérique exploite par l'électricité 20 000 kilomètres de tramways. La ville de Saint-Louis en a 200 à elle seule ; une Compagnie de Boston (*West-End Street Railway*) en exploitait près de 300 en 1893.

TABLE DES MATIÈRES

TROISIÈME CLASSE

TRAMWAYS OU L'ÉNERGIE EST EMPRUNTÉE A UNE USINE CENTRALE MAIS DISTRIBUÉE AUX VOITURES AU FUR ET A MESURE DES BESOINS

CATALOGUE DE LIVRES

SUR LA

CONSTRUCTION ET LES TRAVAUX PUBLICS

PUBLIÉS PAR

LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue est envoyé franco sur demande.

Annales de la construction.

Nouvelles Annales de la construction, fondées par Oppermann. — 12 livraisons par an, formant 1 beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte.

Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale, 20 fr.

Prix de l'année parue, reliée, 20 fr.

Table des matières des années 1876 à 1887, 1 brochure in-12. . . . . . 50 c.

Agenda Oppermann.

Agenda Oppermann paraissant chaque année. Elégant carnet de poche contenant tous les chiffres et tous les renseignements techniques d'un usage journalier. Rapporteur d'angles, coupe géologique du globe terrestre, guide du métreur. — Résumé de géodésie. — Poids et mesures, monnaies françaises et étrangères. — Renseignements mathématiques et géométriques. — Renseignements physiques et chimiques. — Résistance des matériaux. — Electricité. — Règlements administratifs. — Dimensions du commerce. — Prix courants et séries de prix. — Tarifs des Postes et Télégraphes.

Relié en toile, 3 fr. ; en cuir, 5 fr. — Pour l'envoi par la poste, 25 c. en plus.

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Troisième édition française du Manuel de la Société « Hutte » par Philippe Huguenin. 1 volume in-12 contenant plus de 1 200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin. . . . . . 15 fr.

Aide-mémoire des conducteurs des Ponts et Chaussées.

Aide-mémoire des conducteurs et commis des Ponts et Chaussées, agents-voyers, chefs de section, conducteurs et piqueurs des chemins de fer, contrôleurs des mines, adjoints du génie, entrepreneurs et, en général, de toute personne s'occupant de travaux, par Eug. Petit, conducteur des Ponts et Chaussées, 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . 15 fr.

Traité de constructions civiles.

Traité de constructions civiles. Fondations, maçonnerie, pavages et revêtements, marbrerie, vitrerie, charpente en bois et en fer, couverture, menuiserie et ferrures, escaliers, monte-plats, monte-charges et ascenseurs, plomberie d'eau et sanitaire, chauffage et ventilation, décoration, éclairage au gaz et à l'électricité, acoustique, matériaux de construction, résistance des matériaux, renseignements généraux, par E. Barberot, architecte. 1 volume in-8°, avec 1 554 figures dans le texte dessinées par l'auteur. Relié . . . . 20 fr.

Cours de construction.

Cours pratique de construction, rédigé conformément au programme officiel des connaissances pratiques exigées pour devenir ingénieur, par Prud'homme.

Terrassements, — ouvrages d'art, — conduite des travaux, — matériel, — fondations, — dragage, — mortiers et bétons, — maçonnerie, — bois, — métaux, — peinture, jaugeage des eaux, — règlement des usines, etc., 4e édition. 2 volumes in-8°, avec 363 figures dans le texte . . . . 16 fr.

Maçonnerie.

Architecture et constructions civiles. Maçonnerie ; pierres et briques ; leur emploi dans les maçonneries ; proportion des murs ; fondations ; murs de cave et murs en élévation ; des moulures et des ordres ; décoration des murs extérieurs des édifices ; cloisons, planchers, voûtes ; escaliers en maçonnerie ; éléments de décoration intérieure ; revêtement des sols ; roches naturelles ; chaux et ciments ; du plâtre, produits céramiques, par J. Denfer, architecte, professeur à l'École centrale. 2 volumes grand in-8°, avec 794 figures dans le texte . . . . 40 fr.

Charpente en bois et menuiserie.

Architecture et constructions civiles. Charpente en bois et menuiserie ; les bois, leurs assemblages ; résistance des bois ; tableaux, calculs faits ; linteaux et planchers ; pans de bois ; combles ; étaiements, échafaudages, appareils de levage ; travaux hydrauliques, cintres, ponts et passerelles en bois ; escaliers ; menuiserie en bois ; parquets, lambris, portes, croisées, persiennes, devantures, décoration, par J. Denfer, architecte, professeur à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 680 figures dans le texte . . . . 25 fr.

Terrassements, tunnels, etc.

Procédés généraux de construction. Travaux de terrassement, tunnels, dragages et dérochements, par Ernest Pontzen. 1 volume grand in-8°, avec 234 figures dans le texte. . . . . 25 fr.

Mesurage et métrage.

Traité pratique et complet de tous les mesurages, métrages, jaugeages de tous les corps, appliqué aux arts, aux métiers, à l'industrie, aux constructions, aux travaux hydrauliques, aux nivellements pour construction de routes, de canaux et de chemins de fer, drainage, etc., enfin à la rédaction de projets de toute espèce de travaux du ressort de l'architecture et du génie civil et militaire, terminé par une analyse et série de prix avec détails sur la nature, la qualité, la façon et la mise en œuvre des matériaux, par E. Sergent, 8e édition. 2 volumes grand in-8° et 1 atlas de 47 planches in-folio. . . . . 50 fr.

Coupe des pierres.

Traité pratique de la coupe des pierres, précédé de toute la partie de la géométrie descriptive qui trouve son application dans la coupe des pierres, par Lejeune. 1 vol. in-8° et 1 atlas in-4° de 59 planches, contenant 381 figures. 40 fr.

Coupe des pierres.

Coupe des pierres, précédée des principes du trait de stéréotomie, par Eugène Rouché, examinateur de sortie à l'École polytechnique, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, et Charles Brisse, professeur à l'École centrale et à l'École des Beaux-Arts, répétiteur à l'École polytechnique. 1 volume grand in-8° et 1 atlas in-4° de 33 planches . . . . 25 fr.

Matériaux de construction.

Connaissance, recherche et essais des matériaux de construction et de ballastage, par Em. Baudson, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8° . . . . 6 fr

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur.

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur. *Première partie :* Analyse chimique des matériaux de construction, par Ch. Léon Durand-Claye, inspecteur général.

ancien professeur et ancien directeur du Laboratoire à l'École des Ponts et Chaussées, et Deróme, chimiste de ce Laboratoire. *Seconde partie :* Étude spéciale des matériaux, d'agrégation des matériaux, par René Feret, ancien élève de l'École polytechnique, chef du Laboratoire des Ponts et Chaussées à Boulogne-sur-Mer. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. 15 fr.

Chaux et sels de chaux.

Chaux et sels de chaux appliqués à l'art de l'ingénieur, par Grange, agent voyer en chef du département de la Vienne. 1 volume grand in-8° avec figures, dans le texte. . . . . 18 fr.

Carrières de pierre de taille.

Recherches statistiques et expériences sur les matériaux de construction. Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889, publié par le Ministère des Travaux publics et contenant pour chaque carrière : sa désignation et le nom de la commune où elle est située, le mode d'exploitation, le nombre et la hauteur des bancs, la désignation usuelle de la pierre, la nature de la pierre, la position géologique de la carrière, le poids moyen par mètre cube et la résistance à l'écrasement par centimètre carré des échantillons essayés. 1 volume in-4° . . . . 10 fr.

Congrès des procédés de construction.

Congrès international des procédés de construction tenu en 1889 sous la présidence de M. Eiffel. Comptes rendus des séances et visites du Congrès, par Auguste Moreau et Georges Petit, secrétaires du Congrès. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte et 8 planches. . . . . 15 fr.

Murs de soutènement.

Études théoriques et pratiques sur les murs de soutènement et les ponts et viaducs en maçonnerie, par Dubosque, sous-ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien chef de bureau des travaux neufs à la Compagnie du Nord. 5e édition, revue, corrigée et augmentée. 1 volume grand in-8°, avec 15 planches et 141 figures, relié. . . . . 15 fr.

Consolidations des talus.

Traité de consolidation des talus, routes, canaux et chemins de fer, par R. Bruère, ingénieur civil. 1 vol. in-12 et atlas in-8° de 25 pl. doubles. . 10 fr.

Statique graphique.

Eléments de statique graphique, par Eugène Rouché, examinateur de sortie à l'Ecole polytechnique, professeur de statique graphique au Conservatoire des arts et métiers. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 12 fr. 50.

Statique graphique.

Applications de la statique graphique. Charges des ponts et des charpentes, poutres droites, courbes, pleines, à treillis, continues ; arcs métalliques ; fermes métalliques ; piles métalliques ; influence du vent sur les constructions ; déformations ; calcul des poutres pour le lançage et le montage ; piles en maçonnerie ; calcul des joints des poutres ; formules et tables usuelles, par Kœchlin, ingénieur de la maison Eiffel. 1 volume grand in-8° et 1 atlas de 30 planches. . . . . 30 fr.

Statique graphique.

Eléments de statique graphique appliquée aux constructions. 1re *partie :* Poutres droites, poussée des terres, voûtes, par Muller-Breslau (traduction par Seyrig). 2e *partie :* Poutres continues, applications numériques, par Seyrig, ingénieur-constructeur du pont du Douro. 1 volume grand in-8° et un atlas in-4° de 29 planches en 3 couleurs . . . . 20 fr.

Statique graphique.

Traité de statique graphique appliquée aux constructions, toitures, planchers,

poutres, ponts, etc. — Eléments du calcul graphique; des forces et de leur résultante, des moments fléchissants, des efforts tranchants, recherche des maxima, charge permanente, surcharge uniformément répartie, surcharge mobile, données pratiques sur le poids propre des toitures et sur leur surcharge accidentelle, poutres pleines, poutres à treillis simples et multiples, centre de gravité, moment d'inertie, exemples et applications, par MAURICE MAURER, 2e édition. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte, et 1 atlas de 20 planches in-4° . . . . 12 fr. 50

Cours de mathématiques.

Cours de mathématiques pures et appliquées, à l'usage des conducteurs des Ponts et Chaussées, agents voyers, chefs de section, architectes, conducteurs de travaux, entrepreneurs, etc., comprenant, *Arithmétique*, nombres entiers, fractions et nombres fractionnaires, progression, séries et logarithmes, applications. *Géométrie plane :* propriétés et tracé des figures planes, mesure et proportion des figures planes, trigonométrie, courbes diverses. *Géométrie de l'espace :* propriétés et construction des figures de l'espace, mesure des figures de l'espace, géométrie descriptive, perspective. *Algèbre, analyse et géométrie analytique. Mécanique :* statique, dynamique, hydrostatique, hydrodynamique, par L. LANCELIN, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. . . . . 10 fr.

Résumé des connaissances mathématiques.

Résumé des connaissances mathématiques nécessaires dans la pratique des travaux publics et de la construction, par E. MUSSAT, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 133 figures dans le texte . . . . 10 fr.

Traité de topographie.

Traité de topographie. — Appareils d'optique, applications de la géodésie à la topographie, instruments de mesure. levé des plans de surface, levés souterrains, théorie des erreurs, par ANDRÉ PELLETAN, ingénieur en chef des Mines, professeur à l'Ecole des Mines. 1 volume grand in-8°, avec 235 figures dans le texte. Relié . . . . 15 fr.

Cours de topographie.

Cours de topographie. Levé des plans de surface et des plans de mines, par ALFRED HABETS, ingénieur honoraire des Mines, professeur à l'Université de Liège. 2e édition, revue et augmentée, 1 volume grand in-8°, avec 107 figures dans le texte . . . . 8 fr.

Levé des plans et nivellement.

Levé des plans et nivellement. Opérations sur le terrain, opérations souterraines, nivellement de haute précision, par LÉON DURAND-CLAYE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, PELLETAN et LALLEMAND, ingénieurs des Mines. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 25 fr.

Nivellement.

Traité du nivellement, comprenant les principes généraux, la description et l'usage des instruments, les opérations et les applications, par DUPLESSIS. 1 volume in-8°, contenant 112 figures . . . . 8 fr.

Tables tachéométriques.

Tables tachéométriques, donnant aussi rapidement que la règle logarithmique tous les calculs nécessaires à l'emploi du tachéomètre, par LOUIS PONS, ingénieur d'études de chemins de fer. 1 volume in-8°, relié. . . . . 10 fr.

Courbes de raccordement.

Nouvelles tables pour le tracé des courbes de raccordement en arc de cercle (chemins de fer, canaux, routes et chemins), par CHAUVAC DE LA PLACE. 5e édition. 1 volume in-12, relié. . . . . 7 fr. 50

Mouvement des terres.

Théorie et pratique du mouvement des terres d'après le procédé Bruckner,

par Ernest Henry, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 vol. gr. in-8° . . . . 2 fr. 50

Construction des chemins de fer.

Instructions pour la préparation des projets et la surveillance des travaux de construction de la plate-forme des chemins de fer, suivies de tables pour le calcul des courbes et pour l'évaluation des volumes des déblais et des remblais, par L. Partiot, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume petit in-4°, avec 8 planches et de nombreuses figures intercalées dans le texte, relié. 15 fr.

Tracé des chemins de fer.

Tracé des chemins de fer, routes, canaux, tramways, etc. Études préliminaires, études définitives, — recherche et choix des matériaux de construction et de ballastage, par Em. Baudson, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8°, avec 4 planches et 95 figures intercalées dans le texte. . . . . 10 fr.

Cours de routes.

Cours de routes professé à l'École des Ponts et Chaussées. Disposition d'une route, étude et rédaction des projets, construction, entretien, par Ch.-Léon Durand-Claye, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 20 fr.

Pavage en bois.

Le bois et ses applications au pavage à Paris, en France et à l'étranger. Divers systèmes de pavage en bois ; bois employé au pavage ; étude des propriétés physiques, mécaniques, anatomiques et chimiques des bois ; conservation et préparation des bois ; fabrication des pavés ; entretien et durée des pavages en bois ; pavage en bois dans les voies à tramways ; régime des sociétés de pavage en bois ; contrats et cahiers des charges ; fonctionnement du système de la régie, à Paris ; prix de revient, par Albert Petsche, ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien ingénieur du service municipal de Paris. 1 volume in-8°, avec 223 figures dans le texte, relié. . . . . 20 fr.

Traité complet des chemins de fer.

Traité complet des chemins de fer. Historique et organisation financière, construction de la plate-forme, ouvrages d'art, voie, stations, signaux, matériel roulant, traction, exploitation, chemins de fer à voie étroite, tramways, par G. Humbert, ingénieur des Ponts et Chaussées. 3 volumes grand in-8°, avec 700 figures dans le texte . . . . 50 fr.

Chemins de fer. Notions générales et économiques.

Chemins de fer. Notions générales et économiques. Historique, formalités et règlements relatifs à l'exécution des travaux, régimes, développements, dépenses, comparaison des voies ferrées avec les routes et les voies de navigation intérieure, prix de revient des transports sur rails, tarif et leur application, recettes d'exploitation, voie et traction, chemins de fer à voie étroite, considérations économiques, par Léon Leygue, ancien ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur civil. 1 volume grand in-8°. . . . . 15 fr.

Chemins de fer. — Superstructure.

Chemins de fer. Superstructure : voie, gares et stations, signaux, par E. Deharme, ingénieur du service central de la Compagnie du Midi, professeur du cours de Chemins de fer à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 310 figures dans le texte et 1 atlas in-4° de 73 planches doubles . . . . 50 fr.

Chemins de fer d'intérêt local.

Traité des chemins de fer d'intérêt local. Chemins de fer à voie étroite, tramways, chemins de fer à crémaillère et funiculaires, par H. Humbert, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 212 figures dans le texte. Relié. . . . . 20 fr.

Chemins de fer à faible trafic.

Les chemins de fer à faible trafic en France. Lignes secondaires des grands réseaux, chemins de fer d'intérêt local et tramways à vapeur. Etablissement et exploitation, par A. SAMPITE, ingénieur des Ponts et Chaussées, sous-chef de l'exploitation des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8° et 1 atlas in-4° de 16 planches . . . . 15 fr.

Chemins de fer à voie de 0,60 centimètres.

Construction et exploitation des chemins de fer à voie de 0,60 centimètres. Voie, terrassements, ouvrages d'art, machines et matériel roulant, avec étude d'un tracé entre deux points donnés, par R. TARTARY, conducteur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 97 figures dans le texte . . . . . 10 fr.

Chemins de fer d'intérêt local et Tramways.

Chemins de fer d'intérêt local et tramways établis sous le régime de la loi du 11 juin 1880. Résumé des résultats obtenus et critique des différents systèmes employés, par H. HEUDE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume in-8° . . . . 3 fr. 50

Chemins de fer funiculaires.

Etude des chemins de fer funiculaires. Historique et classification, étude du profil en long, résistance au mouvement des trains, engins spéciaux et voie, construction et exploitation, par ALPHONSE VAUTIER, ingénieur civil, 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 2 fr. 50

Chemins de fer funiculaires. — Transports aériens.

Chemins de fer funiculaires. Transports aériens, par A. LÉVY-LAMBERT, ingénieur civil. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 15 fr.

Tramways.

Tramway à vapeur à voie de 0m,60, de Pithiviers à Toury. — I. Description du tracé, du matériel fixe et du matériel roulant, détail des dépenses, par F. LIÉVIN, ingénieur des Ponts et Chaussées. — II. Examen critique des résultats obtenus, par H. HEUDE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in8°, avec une planche . . . . 2 fr. 50

Tramways à air comprimé.

L'air comprimé appliqué à la traction des tramways. Description de la locomotive, compresseurs, chargement de voitures et canalisation, divers modes de transport par l'air comprimé, prix de revient et conclusions, par L.-A. BARBET. 1 volume grand in-8°, avec 96 figures dans le texte . . . . 7 fr. 50

Tramways électriques.

Les tramways électriques. Dispositions générales ; voie ; tramways à conducteurs aériens, souterrains, établis au niveau du sol ; tramways à accumulateurs ; matériel roulant ; stations centrales ; dépenses, par HENRI MARÉCHAL, ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur de la 1re section des Travaux de Paris et du Secteur municipal d'électricité. 1 volume in-8°, avec 118 figures dans le texte, relié . . . . 7 fr. 50

Moyens de transport.

Les moyens de transport appliqués dans les mines, les usines et les travaux publics ; voitures, tramways, chemins de fer, plans inclinés, traînage par câble et par chaîne, etc., organisation et matériel, par EVRARD, 2 vol. in-8°, avec 1 atlas de 123 pages in-folio, contenant 1 400 figures . . . . 100 fr.

Montagnes et torrents.

Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement, par E. THIERY, professeur à l'École nationale forestière, avec une introduction de M. C. LECHALAS. 1 volume grand in-8°, avec 164 figures dans le texte . . . . 15 fr.

Hydraulique agricole.

Hydraulique agricole. Aménagement des eaux ; irrigation des terres labourables, des cultures maraîchères, des jardins, des prairies, etc. ; création et entretien des prairies ; dessèchements, dessalage, limonage et colmatage, curage ; irrigation et drainage combinés ; renseignements complémentaires techniques et administratifs, par J. CHARPENTIER DE COSSIGNY, ancien élève de l'École Polytechnique, lauréat de la Société des Agriculteurs de France, ingénieur civil. 2e édition revue et augmentée. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. . . . . 15 fr.

Hydraulique fluviale.

Hydraulique fluviale. Météorologie et hydrologie ; les fleuves, grandes inondations, navigation ; conditions techniques d'un grand développement de la navigation fluviale ; conclusions, par M. C. LECHALAS, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 17 fr. 50

Navigation intérieure.

Guide officiel de la navigation intérieure, avec itinéraires graphiques des principales lignes de navigation et carte générale des voies navigables de la France, dressé par les soins du MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. Documents réglementaires, nomenclature alphabétique et conditions de navigabilité, notices et tableaux des distances, itinéaires des principales lignes de navigation, itinéraires graphiques, carte au 1/1 500 000e, 5e édition revue et augmentée. 1 volume in-18 jésus, avec 3 planches en couleur et une carte en couleur de 0m,70 sur 0m,65.

Prix : le volume broché et la carte en feuille . . . . 2 fr. 25

Le volume solidement relié et la carte montée sur toile, pliée et reliée comme le volume. . . . . 5 fr.

Rivières et canaux.

Navigation intérieure. Rivières et canaux, par GUILLEMAIN, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'École des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec gravures dans le texte . . . . 40 fr.

Réservoirs.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Les réservoirs d'alimentation d'eau de la Ville de Paris, à Montmartre, avec 2 planches. Livraison de février 1890 . . . . 2 fr.

Réservoir métallique de 200 mètres cubes du service des eaux de Paris, avec une planche. Livraison de septembre 1890 . . . . 2 fr.

Réservoir de Torcy-Neuf, pour l'alimentation du canal du Centre, avec 2 planches. Livraison d'avril 1891 . . . . 2 fr.

Réservoirs à pétrole des docks de Saint-Ouen, avec une planche. Livraison de juin 1877 . . . . 2 fr.

Réservoir de la ville de Norwood (Ohio). Livraison de mars 1895 . . . . 2 fr.

Réservoir en maçonnerie de 8 000 mètres de capacité, sur le plateau d'Avron, avec une planche. Livraison de janvier 1892 . . . . 2 fr.

Réservoir d'eau à l'hospice Ferrari, à Clamart, avec une planche. Livraison de mars 1893. . . . . 2 fr.

Prise d'eau du réservoir de Montaubry (canal du Centre), avec une planche. Livraison de juillet 1893. . . . . 2 fr.

Tour hydraulique pour l'alimentation d'eau de la gare de Brême ; avec une planche. Livraison d'octobre 1893. . . . . 2 fr.

Note sur le calcul des fonds de réservoirs soutenus au pourtour et au centre. Livraison de janvier 1894 . . . . 2 fr.

Barrages-réservoirs.

Étude théorique et pratique sur les barrages-réservoirs. Barrages en terre, barrages mixtes, barrages en maçonnerie, rupture des barrages-réservoirs, par A. DUMAS, ingénieur des Arts et Manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 107 figures dans le texte . . . . 7 fr. 50

Moyens de franchir les chutes des canaux.

Étude sur les moyens de franchir les chutes des canaux. Écluses, plans inclinés, ascenseurs, ascenseur des Fontinettes, par H. GRUSON, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et L.-A. BARBET, ingénieur en chef de l'usine Cail. 1 volume grand in-8°, et 1 atlas in-4°, de 28 planches . . . . 25 fr.

Travaux maritimes.

Travaux maritimes; phénomènes marins; accès des ports. Mouvements de la mer. — Régime des côtes. — Matériaux dans l'eau de mer. — Atterrage. Entrée des ports. Jetées, par LAROCHE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8° et 1 atlas in-4° de 46 planches doubles. . . . . . . 40 fr.

Ports maritimes.

Ports maritimes. Ports d'échouage. — Bassins à flot. — Ecluses des bassins à flot. — Portes d'écluses. — Ponts mobiles. — Moyens d'obtenir et d'entretenir la profondeur à l'entrée des ports. — Moyens d'obtenir et d'entretenir la profondeur dans les ports. Ouvrages et appareils pour la réparation des navires. Défense des côtes. Eclairage et balisage des côtes. Exploitation des ports. Canaux maritimes, par F. LAROCHE, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec figures dans le texte et 2 atlas in-4° contenant 37 planches doubles . . . . 50 fr.

Cours de ponts.

Cours de ponts à l'École des Ponts et Chaussées. Emplacements, débouchés, fondations, ponts en maçonnerie par JEAN RÉSAL, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 vol. gr. in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte.. 14 fr.

Ponts en maçonnerie.

Ponts en maçonnerie, par E. DEGRAND, inspecteur général des Ponts et Chaussées, et J. RÉSAL, ingénieur des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8° avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 40 fr.

Barême des poutres métalliques.

Barême des poutres métalliques à âmes pleines et à treillis, par PASCAL, ingénieur civil. 1 volume in-4° avec figures dans le texte. Relié . . . . . 12 fr. 50

Constructions métalliques.

Constructions métalliques. Elasticité et résistance des matériaux : fonte, fer et acier, par JEAN RÉSAL, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 20 fr.

Ponts métalliques.

Traité pratique des ponts métalliques; calcul des poutres et des ponts par la méthode ordinaire et par la statique graphique, par M. PASCAL, ingénieur, ancien élève de l'École d'Arts et Métiers d'Aix. 1 volume grand in-8° et 1 atlas de 12 planches . . . . 12 fr.

Ponts métalliques.

Ponts métalliques, par JEAN RÉSAL, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Tome premier. — Calcul des pièces prismatiques ; renseignements pratiques ; formules usuelles ; poutres droites à travées indépendantes ; ponts suspendus ; ponts en arc. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . 20 fr.

Tome second. — Poutres à travées solidaires : théorie générale des poutres à section constante; calcul des poutres symétriques ; poutres continues à section variable ; théorie générale des poutres de hauteur variable ; montage des ponts par encorbellement ; ponts-grues ; calculs des systèmes articulés ; piles métalliques ; tables numériques. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. . . . . 20 fr.

Ponts métalliques.

Calcul des ponts métalliques à poutres droites, à une ou plusieurs travées par

la méthode des lignes d'influence. Formules et tables servant au calcul rapide des moments fléchissants et des efforts tranchants maxima déterminés, en divers points des poutres, par des charges uniformément réparties et des charges concentrées mobiles, par ADRIEN CART et LÉON PORTES, ingénieurs civils attachés au service des ponts métalliques de la Compagnie d'Orléans. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte et 2 planches, relié . . . . 20 fr.

Ponts et viaducs métalliques.

Calculs de résistance des ponts et viaducs métalliques à poutres droites, d'après la circulaire ministérielle du 29 août 1891, par MAURICE HULEWICZ, ingénieur, ancien élève de l'École des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 1 planche. . . . . 10 fr.

Ponts métalliques.

Etudes théoriques et pratiques sur les ponts métalliques à une travée et à poutre droites et pleines; par E. DUMETZ, commis des Ponts et Chaussées, attaché au service vicinal du Pas-de-Calais. 1 volume grand in-8°, avec 117 figures dans le texte . . . . 10 fr.

Ponts métalliques.

Ponts métalliques à travées continues. Méthode de calcul satisfaisant aux nouvelles prescriptions du règlement ministériel du 29 août 1891, avec tables numériques pour en faciliter l'emploi, par BERTRAND DE FONTVIOLANT, ingénieur à la Compagnie de Fives-Lille, répétiteur de mécanique appliquée à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 3 planches. . . . . 10 fr.

Stabilité des constructions.

Traité de stabilité des constructions, précédé d'éléments de statique graphique et suivi de compléments de mathématiques. Leçons professées au Conservatoire national des Arts et Métiers et à l'École centrale d'Architecture, par JULES PILLET, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, à l'École nationale des Beaux-Arts, etc. 1 volume grand in-4° de 536 pages imprimé sur très beau papier. Nombreux tableaux graphiques ; abaques et tables numériques ; 600 figures et épures dans le texte . . . . 25 fr.

Résistance des matériaux.

Stabilité des constructions et résistance des matériaux, par A. FLAMANT, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, professeur à l'École des Ponts et Chaussées et à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 264 figures dans le texte . . . . 25 fr.

Moments d'inertie.

Carnet du Constructeur. Recueil de moments d'inertie relatifs à 3 263 poutres composées à âme simple et double d'une hauteur variant de 20 centimètres à 1 mètre, par CHEVALIER et BRUN, ingénieurs-constructeurs. 1 volume in-12. Relié . . . . 7 fr. 50

Serrurerie et Constructions en fer.

Traité pratique de serrurerie. Constructions en fer et serrurerie d'art. — Planchers en fer, linteaux, filets, poutres ordinaires et armées. — Colonnes en fonte, consoles en fonte, colonnes en fer creux, pans de fer, montants en fer composés. — Charpentes en fer, combles, hangars, marchés couverts. — Passerelles et petits ponts. — Escaliers en fer. — Châssis de couche, bâches, serres jardins d'hiver, chauffage, vitrerie. — Volières, tonnelles, kiosques. — Auvents, marquises, vérandas, bow-windows. — Grilles, panneaux de portes, rampes. — Éléments divers de serrurerie et de ferronnerie d'art. — Principaux assemblages employés en serrurerie, etc., etc., par E. BARBEROT. 2e édition et 1 volume grand in-8°, avec 972 figures dans le texte . . . . 25 fr.

Construction en ciment et fer.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Constructions en béton de ciment armé, système Hennebique. Livraison de septembre 1896 . . . . 2 fr.

Éléments des prix de construction.

Recueil d'éléments des prix de construction. Chargements, transports, terrassements, maçonneries, carrelages, pavages, charpentes en bois, couvertures, plomberie, zincage et canalisation, menuiserie, serrurerie et charpente métallique, plâtrerie, vitrerie, peinture, tenture et dorure, par A. MÉGROT, conducteur des Ponts et Chaussées, chef de section des chemins de fer. 1 volume in-12, broché. 7 fr.; relié . . . . 8 fr.

Chauffage et ventilation.

Traité pratique du chauffage et de la ventilation. Principes, appareils, installations : cheminées, poêles, calorifères, chauffages à air chaud et à vapeur. Chauffage et ventilation des maisons particulières, églises, écoles, lycées, banques, magasins, établissements publics, théâtres, hôpitaux, casernes, serres, bains, amphithéâtres, par PH. PICARD, ingénieur des Arts et Manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 506 figures dans le texte relié. . . . . 20 fr

Chauffage et ventilation.

Fumisterie, chauffage et ventilation, par J. DENFER, architecte, professeur du cours d'architecture et de construction civile à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 375 figures dans le texte . . . . 25 fr.

Distribution d'eau.

N. B. — Les études ci-dessous ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Types de bornes-fontaines de ville, bouches d'arrosage et incendie, robinets, etc., avec une planche. Livraison de décembre 1877 . . . . 2 fr.

Distribution d'eau des villes de Cette et de Béziers, avec une planche. Livraison de janvier 1884 . . . . 2 fr.

Distribution d'eau de la ville de Colmar, avec 2 planches. Livraison de janvier 1885 . . . . 2 fr.

Distribution d'eau de la ville de Mulhouse, avec 2 planches. Livraisons de février et mars 1887 . . . . 4 fr.

Distribution d'eau de la ville de Porto, avec 2 planches. Livraison de mai 1890 . . . . 2 fr.

Adduction d'eau à la ville de Liverpool, avec 1 planche. Livraison de février 1893 . . . . 2 fr.

Travaux de barrage du Rhône, à Genève et pour l'utilisation de la force motrice, avec 2 planches. Livraisons d'août et de septembre 1892 . . . . 4 fr.

Outillage mécanique de l'usine pour l'utilisation de la force motrice du Rhône, à Genève, avec 2 planches. Livraisons de septembre et de décembre 1892 du *Portefeuille des machines* . . . . 4 fr.

Distribution d'eau de la ville de Pithiviers. Livraison d'octobre 1893. . 2 fr.

Adduction des eaux des sources de la Vigne et de Verneuil pour l'alimentation de Paris, avec 5 planches. Livraisons d'avril, mai, juin, juillet et novembre 1892 et février 1894 . . . . 12 fr.

Nouvelles installations pour la filtration des eaux de la ville de Hambourg. Livraison de mai 1894 . . . . 2 fr.

Distribution d'eau de Scutari-Kadikeui, avec 1 planche. Livraison de février 1895 . . . . 2 fr.

Travaux de dérivation du Rhône à Jonage, pour l'utilisation de la force motrice du Rhône à la distribution de l'énergie électrique, avec 2 planches. Livraisons de juillet, août et septembre 1896 . . . . 6 fr.

Hygiène générale et industrielle.

Hygiène générale et hygiène industrielle, ouvrage rédigé conformément au programme du cours d'hygiène industrielle de l'École centrale, par le Docteur LÉON DUCHESNE, ancien interne des hôpitaux de Paris, ancien président de la Société de médecine pratique de Paris. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte . . . . 15 fr.

ÉLECTRICITÉ

Traité d'électricité et de magnétisme.

Traité d'électricité et de magnétisme. Théorie et applications, instruments et méthodes de mesure électrique. Cours professé à l'école supérieure de télégraphie, par A. Vaschy, ingénieur des télégraphes, examinateur d'entrée à l'École polytechnique. 2 vol. gr. in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. 25 fr.

Théorie de l'électricité.

Théorie de l'électricité. Exposé des phénomènes électriques et magnétiques fondé uniquement sur l'expérience et le raisonnnement, par A. Vaschy, ingénieur des télégraphes, examinateur d'admission à l'École polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec 74 figures dans le texte, relié. . . . . 20 fr.

Traité pratique d'électricité.

Traité pratique d'électricité à l'usage des ingénieurs et constructeurs. Théorie mécanique du magnétisme et de l'électricité, mesures électriques, piles, accumulateurs et machines électrostatiques, machines dynamo-électriques génératrices, transport, distribution et transformation de l'énergie électrique, utilisation de l'énergie électrique, par Félix Lucas, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, administrateur des chemins de fer de l'État. 1 volume grand in-8°, avec 278 figures dans le texte. . . . . 15 fr.

Électricité industrielle.

Traité d'électricité industrielle, théorique et pratique, par Marcel Deprez, membre de l'Institut, professeur d'électricité industrielle au Conservatoire national des arts et métiers, professeur suppléant au Collège de France. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, paraissant en 4 fascicules. Prix de souscription à l'ouvrage complet. . . . . 40 fr.

Chaque fascicule se vend séparément. . . . . 12 fr.

Électricité industrielle.

Traité pratique d'électricité industrielle. Unités et mesures; piles et machines électriques ; éclairage électrique ; transmission électrique de l'énergie ; galvanoplastie et électro-métallurgie ; téléphonie, par E. Cadiat et L. Dubost. 5e édition. 1 volume grand in-8°, avec 277 gravures dans le texte, relié. . . . . 16 fr. 50

Manuel pratique de l'électricien.

Manuel pratique de l'électricien. Guide pour le montage et l'entretien des installations électriques, par E. Cadiat. 2e édition 1 volume in-12, avec 229 fig. dans le texte, relié. . . . . 7 fr. 50

Aide-mémoire de poche de l'électricien.

Aide-mémoire de poche de l'électricien ; guide pratique à l'usage des ingénieurs, monteurs, amateurs, électriciens, etc., par Ph. Picard et A. David, ingénieurs des arts et manufactures. 1 petit volume, format oblong de 0m,125 × 0m,08, relié en maroquin, tranches dorées. . . . . 5 fr.

Contrôle des installations électriques.

Contrôle des installations électriques au point de vue de la sécurité. Le courant électrique, production et distribution de l'énergie, mesures, effets dangereux des courants, contrôle à l'usine, contrôle du réseau, des installations intérieures et des installations spéciales, résultats d'exploitation, règlements français et étrangers, par A. Monmerqué, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, ancien ingénieur des services de la première section des travaux de Paris et du secteur municipal d'électricité, précédé d'une préface de M. Hippolyte

ateliers de construction des manufactures de l'Etat, 2e édition. 1 vol. in-12, avec de nombreuses figures dans le texte. Prix relié. . . . . 7 fr. 50

Éclairage électrique.

N. B. — Les mémoires ci-dessous ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison.

Locomobile électrique de Gramme destinée à l'éclairage à distance pour la défense des places, avec 1 planche. Livraison de juillet 1878. . . . . . . 2 fr.

Éclairage électrique de la Gran Plaza de Toros du Bois de Boulogne à Paris, avec 1 planche. Livraison de mars 1891. . . . . 2 fr.

Usine municipale d'électricité des Halles centrales à Paris, avec 3 planches. Livraisons de juillet et d'août 1891 . . . . 4 fr.

Éclairage électrique de Saint-Pancras, station de Regent's Park, à Londres, avec 1 planche. Livraison de septembre 1892. . . . . 2 fr.

Éclairage électrique de l'avenue de l'Opéra. Livraison de février 1897. 2 fr.

Éclairage électrique.

Étude pratique sur l'éclairage électrique des gares de chemins de fer, ports, usines, chantier est établissements industriels par Georges Dumont, avec la collaboration de Gustave Baignières. 1 volume gr. in-8°, avec deux planches. 5 fr.

Éclairage à Paris.

L'éclairage à Paris. Etude technique des divers modes d'éclairage employés à Paris sur la voie publique, dans les promenades et jardins, dans les monuments, les gares, les théâtres, les grands magasins, etc., et dans les maisons particulières. — Gaz, électricité, pétrole, huile, etc. ; usines et stations centrales, canalisations et appareils d'éclairage ; organisation administrative et commerciale, rapports des compagnies avec la Ville ; traités et conventions ; calcul de l'éclairement des voies publiques ; prix de revient, par Henri Maréchal, ingénieur des Ponts et Chaussées et du service municipal de la ville de Paris. 1 volume grand in-8°, avec 221 figures dans le texte, relié. . . . . 20 fr.

Électricité.

Manuel élémentaire d'électricité, par Fleeming Jenkin, professeur à l'Université d'Edimbourg ; traduit de l'anglais par N. de Tédesco. 1 volume in-12, avec 32 gravures . . . . 2 fr.

Courants polyphasés.

Courants polyphasés et alterno-moteurs. Théorie, construction, mode de fonctionnement et qualités des générateurs et des moteurs à courants alternatifs et polyphasés, transformateurs polyphasés et mesure de la puissance dans les systèmes polyphasés, par Silvanus P. Thompson, directeur du collège technique de Finsbury, à Londres, traduction par E. Boistel, ingénieur-expert près le tribunal de la Seine. 1 vol. grand in-8°, avec 173 figures dans le texte, relié. 16 fr.

Courants alternatifs d'électricité.

Les courants alternatifs d'électricité, par T. H. Blakesley, professeur au Royal Naval College de Greenwich, traduit de la 3e édition anglaise et augmenté d'un appendice, par W. C. Rechniewski. 1 volume in-12 avec figures dans le texte, relié. . . . . 7 fr. 50

Transformateurs.

Les transformateurs à courants alternatifs simples et polyphasés. Théorie, construction, applications, par Gisbert Kapp, traduit de l'allemand par A. O. Dubsky et G. Chenet, ingénieurs électriciens. 1 volume in-8°, avec 132 figures dans le texte, relié. . . . . 12 fr.

Problèmes sur l'électricité.

Problèmes sur l'électricité. Recueil gradué comprenant toutes les parties de la science électrique, par le Dr Robert Weber professeur à l'Académie de Neuchâtel, 2e édition. 1 volume in-12, avec figures dans le texte. . . . . . . 6 fr

Installations électriques. Mesures de précaution.

Installations électriques d'éclairage et de transport d'énergie. Commentaires sur les mesures de précaution prescrites par l'Union des Compagnies allemandes d'Assurance contre l'incendie, par le Dr Oscar May, traduit de l'allemand sous la direction de Ph. Delahaye. 1 brochure grand in-8°, avec 13 figures dans le texte . . . . 1 fr. 50

Transmission de force.

Transmission de force pour l'électricité appliquée à l'usine de fabrication d'engrais chimiques de P. Linet à Aubervilliers. Cette étude a paru dans la livraison de juin 1896 du *Portefeuille des machines*. Prix de la livraison . 2 fr.

Accumulateurs électriques.

Recherches théoriques et pratiques sur les accumulateurs élecriques, par René Tamine. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte. . . . 7 fr. 50

Accumulateur voltaïque.

Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par Émile Reynier. 1 vol. gr. in-8°, avec 62 gravures dans le texte et un portrait de M. Gaston Planté. 6 fr.

Voltamètres-régulateurs.

Les voltamètres-régulateurs zinc-plomb. Renseignements pratiques sur l'emploi de ces appareils, leur combinaison avec les dynamos et les circuits d'éclairage, par Émile Reynier. 1 brochure in-8°, avec gravure et schémas d'installation . . . . 1 fr. 25

Téléphone.

Le Téléphone, par William-Henri Preece, électricien en chef du *British Post-Office*, et Julius Maier, docteur ès sciences physiques. 1 volume grand in-8°, avec 290 gravures dans le texte. . . . . 15 fr.

Télégraphie électrique.

Traité de télégraphie électrique. — Production du courant électrique. — Organes de réception. — Premiers appareils. — Appareil Morse. — Appareils accessoires. — Installation des postes. — Propriétés électriques des lignes. — Lois de la propagation du courant. — Essais électriques, recherches des dérangements. — Appareils de translation, de décharge et de compensation. — Description des principaux appareils et des différents systèmes de transmission. — Etablissement des lignes aériennes, souterraines et sous-marines par H. Thomas, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 702 figures dans le texte. Relié. . . . . 25 fr.

Télégraphie sous-marine.

Traité de télégraphie sous-marine. — Historique. — Composition et fabrication des câbles télégraphiques. — Immersion et réparation des câbles sous-marins. — Essais électriques. — Recherche des défauts. — Transmission des signaux. — Exploitation des lignes sous-marines, par Wunschendorff, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 469 gravures dans le texte. 40 fr.

Tirage des mines par l'électricité.

Le tirage des mines par l'électricité, par Paul-F. Chalon, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-18 jésus, avec 90 figures dans le texte. Prix, relié. . . . . 7 fr. 50

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY



DATE DUE